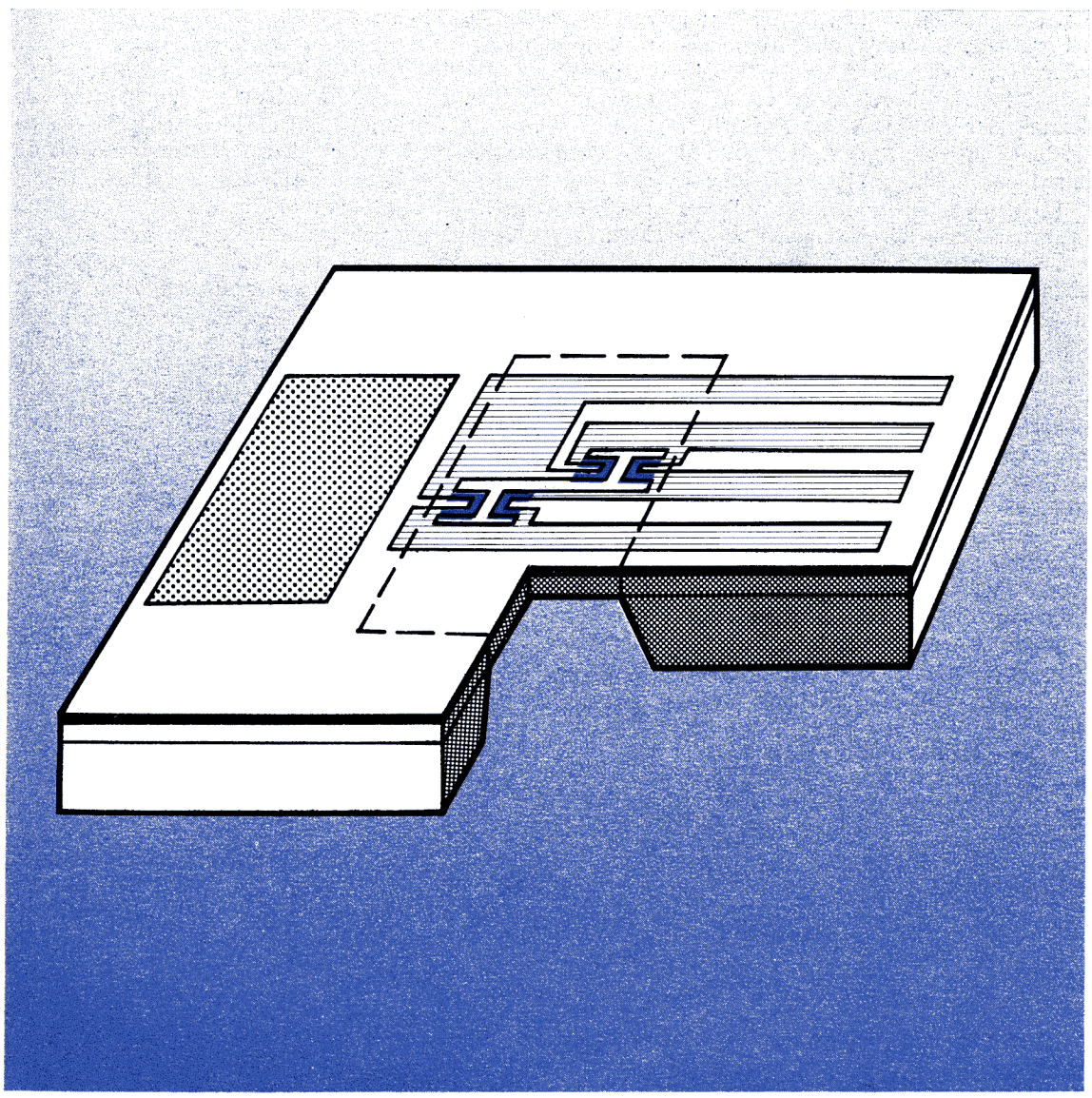
mst

8
1988

VEB
Ammendorfer
Plastwerk
Wissenschaftliche
Bibliothek - PSF 10
Halle - 4073

messen·steuern·regeln



VEB
Verlag Technik
Berlin
EVP: 4,- M

Meß- und Automatisierungstechnik heute

Im Reproduktionsprozeß vollzieht sich tendenziell ein Übergang von der extensiven zur intensiv erweiterten Reproduktion. Dieser Übergang resultiert aus der qualitativ neuen Stufe der Entwicklung der Produktivkräfte ebenso wie aus volkswirtschaftlichen Erfordernissen und aus technisch-technologischen Innovationen, die als Intensivierungsfaktoren wirken. Allgemeiner Ausdruck der Intensivierung ist die Aufwertung von Investitions- und Konsumgütern durch umfassende Automatisierung, die durch erhöhte Leistungsfähigkeit der Automatisierungsanlagen- und -gerätetechnik auf mikroelektronischer Basis bei weiter sinkenden Kosten ermöglicht wird.

Neben der zunehmenden Anwendungsbreite der Automatisierung werden auch qualitativ neue und komplexere Einsatzbereiche erschlossen. Durch Computereinsatz wird die Automatisierung großer Systeme, die flexible Automatisierung von Fertigungsprozessen oder die Automatisierung geistiger Prozesse möglich. Damit wird ein verstärkter Einfluß der Automatisierung auf die Gesellschaft ausgeübt, sowohl direkt auf Arbeits-, Kommunikations-, Verteilungs-, Transport- und andere Prozesse als auch indirekt auf Entwicklungen innerhalb der Gesellschaft, bis hinein in den sozialen oder den geistig-kulturellen Bereich. Ein typisches Merkmal dieser Entwicklung ist eine größere Flexibilität der Produktions- und Leitungssysteme. Andererseits ist die Intensivierung verknüpft mit einer größeren Komplexität der Prozesse und Strukturen („Fluch der hohen Dimension"), so daß eine zunehmend ganzheitliche Betrachtungsweise erforderlich ist, was die Differenzierung der Wissenschaftsgebiete in diesen Bereichen aufhebt und integrale Denk- und Arbeitsweisen provoziert.

Automatisierung erfordert eine gründliche Analyse der zu automatisierenden Prozesse, eine zugehörige Modellbildung, Simulation und Strukturänderung.

Derartige Aufgaben bedürfen allerdings einer fundierten Information über Prozeßgrößen, Einfluß- und Störgrößen, vor- und nachgelagerter Prozesse u. a., die von Meßgeräten und -systemen geliefert werden. Die Automatisierungstechnik ist deshalb sehr eng mit der Meßtechnik verkoppelt, wenn auch keinesfalls Identität zwischen diesen Disziplinen postuliert werden darf: beide stehen im allgemeinen auf unterschiedlichen Niveaustufen in hierarchisch strukturierten Systemen. Messen heißt also: Gewinnen von Informationen an Objekten oder Vorgängen oder über Größen oder Vorgänge, die Objekte beschreiben. Mit Hilfe der Meßtechnik werden gezielte Fragen an Meßobjekte gestellt; die Antworten werden in Form von Meßwerten gegeben. Diese Fragestellung an das Objekt ist für die Meßtechnik primär. Die Interpretation und Verwendung der Antwort (und damit die Informationsverarbeitung und -nutzung) ist somit eher sekundär.

Die hier skizzierte Objektbindung bestimmt wesentlich den Charakter der Meßtechnik, die sich zugleich in einer gewissen Eigenständigkeit ihrer Teildisziplinen (Fehlertheorie, Meßdynamik . . .) und einer prozeßtypischen Spezialisierung (Fertigungs-, Prozeß-, Analysenmeßtechnik . . .) niedergeschlagen hat.

Ähnlich wie in der Automatisierungstechnik sind heute auch für die Meßtechnik integrale Denk- und Arbeitsweisen charakteristisch: mit Rechnerunterstützung werden zunehmend indirekte Messungen möglich. Damit werden Informationen über Größen gewonnen, die einer direkten Messung nicht zugängig sind oder sogar als direkte Verkörperung nicht existieren, wie das für die Qualität eines Produkts durchaus zutreffen kann.

Mit Verfeinerung der Kenntnisse über Objekte, Prozesse oder Strukturen wächst aber auch wieder deren Komplexität, so daß sich hier eine weitere Problematik auftut: die Diskrepanz zwischen dieser wachsenden Komplexität und der subjektiven Begrenztheit von Einzelpersonen, die sich mit den Begriffen Wissensvorrat und Entscheidungsmöglichkeit nur andeuten lassen. Das bedeutet aber nichts anderes, als daß sich mit wachsender Komplexität der Verantwortungsbereich des einzelnen durchaus vergrößern kann. Immerhin können die Wirkungen von Fehlhandlungen und -interpretationen im Technikbereich länderübergreifende Auswirkungen haben, wie Ereignisse der letzten Zeit deutlich werden ließen.

Damit sind Entscheidungshilfen etwa in Form wissensverarbeitender Systeme ein Mittel zur Reduzierung der Diskrepanz zwischen Komplexität von Systemen und dem Wissensvorrat des Individuums, was wiederum deutlich macht, daß die Kreativität des Menschen durch Meßtechnik und Automatisierung eher herausgefordert als eingeschränkt wird.

Mit diesen skizzenhaften Darstellungen von Entwicklungstendenzen sind auch einige Arbeitsgebiete der Wissenschaftlich-Technischen Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) umrissen. In diesem Heft finden Sie unter der Rubrik „Aus der Arbeit der WGMA" Hinweise zu den Aufgaben und Zielen der WGMA sowie die Nennung der heute arbeitenden Fachausschüsse und Fachunterausschüsse.

msr 8929 Prof. Dr. sc. techn. *Werner Richter*,
Vorsitzender der WGMA

messen·steuern·regeln

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift für die Automatisierungstechnik

Herausgeber:
Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT

Redaktionsbeirat:
Dr. rer. nat. A. BORGWARDT, Prof. Dr. sc. techn. G. BRACK, Dipl.-Ing. H.-H. EHLERT, Prof. Dr. sc. techn. W. FRITZSCH, Prof. Dr. sc. techn. H. FUCHS, Dr rer. nat. H. GENA, Dipl.-Ing. H. GOTTSCHALK, Dr.-Ing. K. HILSCHER, Prof. Dr.-Ing. habil. D. HOFMANN, Dr.-Ing. G. MEISTER, Dr.-Ing. J. MÜLLER, Prof. Dr. sc. techn. R. MÜLLER, Prof. Dr. sc. techn. P NEUMANN, Prof. Dr.-Ing. S. PILZ, Prof. em. Dr sc. techn. Dr.-Ing. E. h. K. REINISCH, Prof. Dr. sc. techn. W. RICHTER, Dr -Ing. H. SCHULZE, Prof. Dr. sc. techn. H. TÖPFER, Prof. Dr sc. oec. G. VIEHWEGER, Prof. Dr. sc. techn. W. WELLER, Prof. Dr. sc. techn. J. WERNSTEDT

Zum Titelbild:

Siliziumdrucksensoren werden im breiten Umfang zur Druck- und Durchflußmessung genutzt. Unser Titelbild zeigt schematisch einen in der DDR entwickelten Drucksensorchip mit den äußeren Abmessungen (5×5×0,5) mm³ für einen Nenndruck von 100 kPa.
Näheres zu dieser interessanten Thematik vermittelt unser Beitrag auf S. 341

Titelgrafik: G. SCHWESINGER

8
1988

31 Jahrgang

ISSN 0026-0347

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Aufsätze

J. Lämmel
3. Konferenz zum wissenschaftlichen Gerätebau an der Ingenieurhochschule Mittweida 338

M. Horn und *W. Richter*
Grenzen selbstkalibrierender Meßsysteme 338

D. Schubert, F. Schwabe und *T. Uhlig*
Drucksensor mit piezoresistiven Widerständen aus polykristallinem Silizium 341

C. Hamann
Sensoren mit organischer Komponente 345

F. Dettmann, U. Loreit, S. Linke und *P. Pertsch*
Magnetoresistive Sensorelemente 348

H. Nowak, G. Albrecht und *K.-H. Berthel*
Anwendung supraleitender Sensoren für biomagnetische Messungen 351

H. Ullmann
Festelektrolytsensoren 356

G. Linß, P. Brückner und *C.-B. Nopper*
CCD-Liniensensoren zur berührungslosen Längenmessung 360

M. T. Pham, W. Hoffmann, J. Hüller, H. Langenhagen und *J. Schöneich*
Feldeffekttransistor als chemischer Sensor 365

T. Elbel und *J. E. Müller*
Thermoelektrische Sensoren zur berührungslosen Temperaturmessung 369

Aus der Arbeit der WGMA 373
Messen und Ausstellungen 377
Buchbesprechungen 381
Neue Bücher aus der UdSSR 384
Vorschau und Kurzinformationen 3. US

3. Konferenz zum wissenschaftlichen Gerätebau an der Ingenieurhochschule Mittweida

Im Auftrag des Koordinierungsrates Wissenschaftlicher Gerätebau (Akademie der Wissenschaften, Ministerium für Hoch- und Fachschulwesen, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften) wird vom 13. bis 15. September 1988 an der Ingenieurhochschule Mittweida die 3. Konferenz zum wissenschaftlichen Gerätebau durchgeführt.
Organisator ist die Koordinierungsstelle für den Wissenschaftlichen Gerätebau des Ministeriums für Hoch- und Fachschulwesen.
Diese Konferenz reiht sich in die Aktivitäten des Koordinierungsrates ein, in abgestimmter Weise den forschenden Wissenschaftlern der Bereiche des Koordinierungsrates modernste Forschungstechnik verfügbar zu machen. Mit dieser Zielstellung sind führende Wissenschaftler der Akademien, des Hochschulwesens und der Industrie gewonnen worden, neue Gerätelösungen vorzustellen und über die Vervollkommnung der technologischen Basis und gemeinsame Probleme des wissenschaftlichen Gerätebaus zu diskutieren. Plenarvorträge, Haupt- und etwa 80 Kurzvorträge in den 4 Tagungsgruppen

— Ultrapräzisionsbearbeitung
— Sensoren/Aktoren
— Experimentautomatisierung
— Grundlagen und Nutzung von Lasern

sowie Rundtischgespräche u. a. zu ökonomischen Problemen des wissenschaftlichen Gerätebaus, sollen den 400 geladenen Gästen, die größtenteils selbst in Struktureinheiten des wissenschaftlichen Gerätebaus tätig sind, Erfahrungen vermitteln und Möglichkeiten des Gedankenaustausches geben. Mit der Teilnahme von Vertretern der Industrie wird der Tatsache Rechnung getragen, daß Forschungstechnik und -technologie in wachsendem Maße zur entscheidenden Voraussetzung für neue Produktionsmittel und industrielle Technologien werden.
Dieses Heft der Zeitschrift „messen — steuern — regeln" beinhaltet wesentliche Beiträge, die der Konferenz entstammen.

Prof. Dr. sc. techn. J. LÄMMEL, Leiter der Koordinierungsstelle für den Wissenschaftlichen Gerätebau des Ministeriums für Hoch- und Fachschulwesen

M. Horn, W. Richter

Grenzen selbstkalibrierender Meßsysteme

0. Einleitung

Selbstkalibrierende Meßsysteme zählen heute zu den weit entwickelten Formen „intelligenter" Meßtechnik [1] [3] und [4]. Bei oberflächlicher Betrachtung kann leicht der Eindruck entstehen, daß mit hinreichendem Computereinsatz und beliebig kurzen Kalibrierzyklen jede beliebige Meßgenauigkeit erreichbar ist.
In [1] wurde jedoch berechtigt darauf hingewiesen, daß durch die begrenzte Beobachtungsdauer ein Fehlerbetrag entsteht, der mit kürzer werdendem Kalibrierungszyklus die Fehlergrenze des Meßsystems erreichen kann.
Über diese Betrachtungsweise hinausgehend läßt sich zeigen, daß auch ein zeitlich langsamer Anstieg des Meßfehlers (Drift) berücksichtigt und außerdem der Beobachtungsfehler der Realität besser entsprechend angegeben werden kann. Die Summe aus Beobachtungsfehler und zeitlichem Anstieg des Meßfehlers ergibt dann den Gesamtfehler des Meßsystems. Dieser hat ein Optimum, das von den Eigenschaften des Meßsystems abhängt; bei gegenüber der Optimalzeit kürzeren Beobachtungszeiten dominiert der Beobachtungsfehler, bei längeren der Fehler des Meßsystems.
Dieser Optimalwert des Fehlers, der nicht unterschritten werden kann, wird aus dem zeitlichen Fehleranstieg und der Grenzfrequenz des Meßsystems berechnet.
Ursachen des zeitlichen Fehleranstieges sind Langzeiteffekte, wie Änderungen von Bauelementeeigenschaften (Alterung), und zufällige Störgrößen mit langsamen Verlauf.
Von Störgrößen verursachte zufällige Fehler sind über Einflußkoeffizienten mit diesen verknüpft [2]; aus den zeitlichen Anstiegen der Störgrößen können also die zeitlichen Anstiege der Fehler berechnet werden. In der Kraftmeßtechnik wird beispielsweise der zeitliche Temperaturanstieg auf 5 K/h begrenzt.
Daraus ergibt sich die maximal zugelassene Größe der Temperatureinflußkoeffizienten, für die bei bekannter Grenzfrequenz des Meßsystems durch automatische Selbstkalibrierung eine vorgegebene Fehlergrenze erreicht werden kann.

1. Berechnung des Fehlers durch Signalfensterung

In selbstkalibrierenden Meßsystemen wird die Kalibrierung periodisch durch Vergleich mit geeigneten Referenzgrößen aktualisiert. Die Referenzgrößen werden dazu parallel oder in Reihe zur Meßgröße geschaltet; meistens wird dabei die Meßgröße vom Eingang des Meßsystems abgeschaltet [3] und [4]. Nach der Kalibrierung, d. h. nach der Aktualisierung der meßgeräteinternen Verkörperung des

Dr.-Ing. MICHAEL HORN (41) erlernte den Beruf eines Schaltanlagenmonteurs. Von 1966 bis 1971 Physikstudium, Vertiefungsrichtung Festkörperphysik an der KMU Leipzig. Danach Entwicklungsingenieur im VEB Chemieanlagenbau Leipzig-Grimma. Postgradualstudium chemische Verfahrenstechnik 1973. Promotion A Automatisierungstechnik 1982 an der HU Berlin. Seit 1986 im Industrie-Hochschul-Komplex, Bereich Sensortechnik, der TH Leipzig, Sektion Automatisierungsanlagen.
Prof. Dr. sc. techn. WERNER RICHTER (57) studierte von 1952 bis 1958 Luftfahrttechnik in Rostock und Dresden und war anschließend auf den Gebieten der Geräteentwicklung und der Fernwirktechnik tätig. 1968 Promotion A (Gleichlaufprobleme der großformatigen Bildtelegrafie). 1969 Berufung zum Dozenten für Prozeßmeßtechnik an die TU Dresden. 1973 Promotion B (Frequenzanaloge Meßsysteme). 1974 Berufung zum o. Professor für Meßtechnik an die IHS Leipzig (seit 1977 TH Leipzig). Seit 1975 Direktor der Sektion Automatisierungsanlagen dieser Hochschule. Seit 1982 Vorsitzender der WGMA.

Null- und des Kalibrierpunktes, steht das System für die begrenzte Zeit T bis zum nächsten Kalibriervorgang zur Messung zur Verfügung.

Die Wirkung dieses Zeitfensters auf den Fehler während der Messung wird in [1] für harmonische, konstante und regellose bandbegrenzte Signale untersucht. Der größte Fehler tritt danach für konstante Meßgrößen auf.

In diesem Beitrag werden daher nur im Beobachtungszeitraum konstante Meßgrößen betrachtet.

Zur Quantifizierung des Fehlers wird in [1] das Signalspektrum der Überlagerung des Konstantmeßwertes y_0 mit einer Fensterfunktion der Breite T berechnet. Das Spektrum hat die Form

$$Y(f) = Y_{0T}\frac{\sin(\pi Tf)}{\pi Tf}. \tag{1}$$

Der mittlere quadratische Fehler wird durch die Beziehung

$$\overline{\varepsilon^2(T)} = \frac{1}{T}\cdot\int_{-T/2}^{T/2}\varepsilon^2(t)\,\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_{-\omega}^{-f_g}|X(f)|^2\,\mathrm{d}f + \frac{1}{T}\cdot\int_{f_g}^{\omega}|X(f)|^2\,\mathrm{d}f \tag{2}$$

abgeschätzt.

Auf die Signalleistung y_0^2 bezogen ergibt sich daraus das relative Fehlerquadrat zu

$$F^2 = \frac{2}{\pi}\left[\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2\alpha_r} - \frac{\cos(2\alpha_r)}{2\alpha_r} - \mathrm{Si}(2\alpha_r)\right]. \tag{3}$$

mit der Grenzfrequenz des Meßsystems f_g und $\alpha_r = \pi T f_g$.

Die Fehlerberechnung unter Benutzung von (2) liefert aber viel zu große Werte, da in der Praxis auch im Beobachtungsfenster die Einschwingzeit abgewartet wird, bevor der Meßwert gültig ist.

Zur Berechnung des mittleren Fehlers in der gültigen Meßzeit wird das durch einen Rechtecktiefpaß der Grenzfrequenz f_g begrenzte Spektrum nach (1) in den Zeitbereich zurücktransformiert:

$$y_g(t) = \frac{y_0 T}{r2\pi}\cdot\int_{-2\pi f_g}^{2\pi f_g}\frac{\sin\pi fT}{\pi fT}\exp(-\mathrm{i}\,2\pi fT)\,\mathrm{d}f. \tag{4}$$

Danach ergibt sich für die durch f_g „beschnittene" Zeitfunktion $y_g(t)$

$$y_g(t) = \frac{y_0}{\pi}\left[\mathrm{Si}\left(2\pi f_g\left(\frac{T}{2}-t\right)\right) + \mathrm{Si}\left(2\pi f_g\left(\frac{T}{2}+t\right)\right)\right]. \tag{5}$$

Die Zeitfunktion $y_g(t)$ ist im Bild 1a für $f_g \cdot T = 10$ dargestellt. Es ist zu erkennen, daß der relative Fehler bei voller Ausnutzung des Beobachtungsintervalls größer wird, daß also, wie das bei realen Messungen stets der Fall ist, eine Einschwingzeit abgewartet werden sollte, bevor der Meßwert als gültig angesehen wird.

Im Beobachtungsfenster gilt

$$\varepsilon(t) = (y_g(t) - y_0), \tag{6}$$

und damit wird der mittlere quadratische Fehler in der gültigen Meßzeit KT $(K < 1)$

$$\overline{\varepsilon^2(T)} = \frac{y_0^2}{KT\pi^2}\cdot\int_{-KT/2}^{KT/2}\left[\mathrm{Si}\left(2\pi f_g\left(\frac{T}{2}-t\right)\right) + \mathrm{Si}\left(2\pi f_g\left(\frac{T}{2}+t\right)-\pi\right)\right]^2\mathrm{d}t. \tag{7}$$

Da das Produkt der beiden Si-Funktionen in (7) analytisch nicht integrierbar ist, erfolgte die Integration in Abhängigkeit von K und f_gT numerisch.

Si(z) wurde dazu nach [5] für $z < 13$ aus der Potenzreihe, für größere z aus der Potenzfunktionsnäherung berechnet.

Im Bild 2 sind die aus (7) berechneten, für die weitere Anwendung wesentlichen oberen Hüllkurven des relativen Fehlers in Abhängigkeit von f_gT mit K als Parameter gezeigt.

In diese Darstellung wurde der relative Fehler nach (3) gestrichelt eingetragen.

Nach Bild 2 lassen sich die im folgenden als Beobachtungsfehler F_T bezeichneten oberen Hüllkurven des relativen Fehlers analytisch in der Form

$$F_T = A\cdot F(K)\cdot\frac{1}{f_gT} \tag{8}$$

darstellen.

Dabei ist A ein um den Wert 1 schwankender Faktor, dessen Schwankungen mit $1/f_gT$ abnehmen, im relevanten Bereich also völlig abgeklungen sind, und $F(K)$ die Abhängigkeit des Beobachtungsfehlers von der relativen, auf f_gT bezogenen Integrationsgrenze K.

Bild 1b zeigt F_T für $f_gT = 10$ in Abhängigkeit von K. Der relative Fehler konvergiert also für ein festes f_gT schnell gegen einen kleinsten Wert, der durch $F(K) = 0{,}143$ gegeben ist.

2. Berechnung der Optimalwerte für Fehler und Beobachtungsdauer

Für eine festgelegte Grenzfrequenz kann Bild 2 als Darstellung des relativen Fehlers in Abhängigkeit von der Beobachtungsdauer aufgefaßt werden.

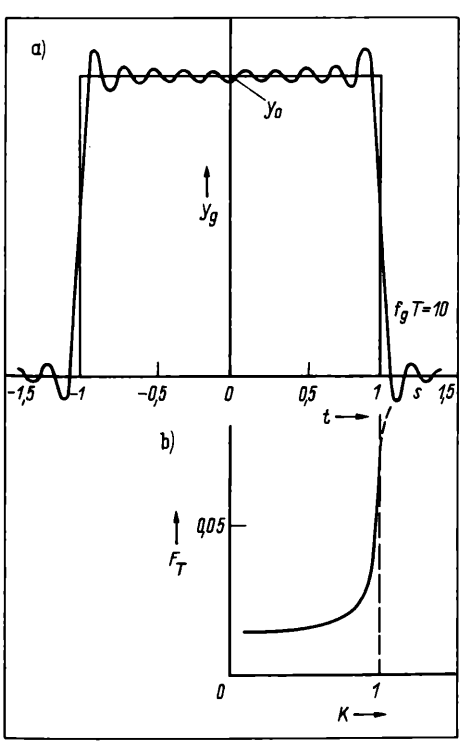
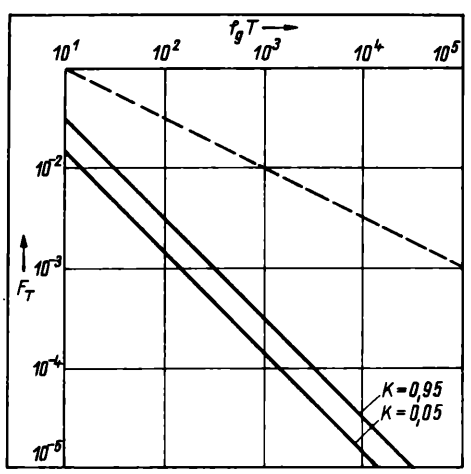


Bild 1. Nach (5) ermittelte Zeitfunktion (a) und mittlerer quadratischer Fehler (b) jeweils für $f_g \cdot T = 10$

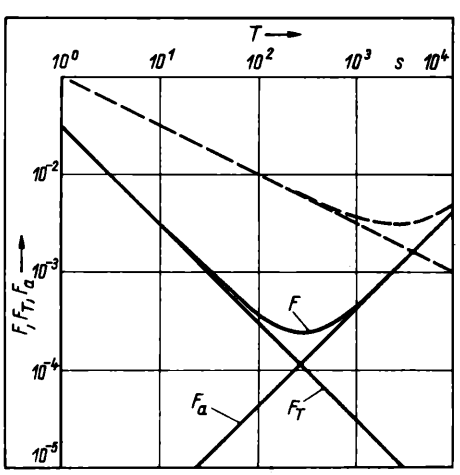
Bild 2. Abhängigkeit der oberen Hüllkurve des Beobachtungsfehlers von f_gT mit der relativen Integrationsgrenze K als Parameter
Abhängigkeit nach (3) gestrichelt

Bild 3. Zeitabhängigkeiten des Beobachtungsfehlers F_T, des Driftfehlers F_a und des Gesamtfehlers $F = F_T + F_a$
$f_g = 10\,\mathrm{s}^{-1}$, $a = 4{,}234\cdot10^{-7}\,\mathrm{s}^{-1}$, $K = 0{,}95$; Abhängigkeit nach (3) gestrichelt

2



3



Während der gültigen Beobachtungsdauer steigt jedoch der momentane relative Driftfehler F_a', der in der Form

$$F_a' = a \cdot t \tag{9}$$

beschrieben werden kann, wobei a der zeitliche Fehleranstieg ist. Von diesem momentanen Fehler ist im gültigen Meßbereich KT der quadratische Mittelwert zu bilden:

$$F_a^2 = \frac{1}{KT} \int_0^{KT} (F_a'(t))^2 \, dt \tag{10}$$

$$F_a = \frac{a}{\sqrt{3}} KT . \tag{11}$$

Der Gesamtfehler F entsteht aus

$$F = F_a + F_T . \tag{12}$$

Im Bild 3 sind F_a, F_T und F für $f_g = 10\,s^{-1}$ und $K = 0{,}95$ in Abhängigkeit von der Beobachtungszeit dargestellt.
Im Schnittpunkt von F_a und F_T ergeben sich ein optimaler Fehler und eine optimale Meßzeit: für kleinere Meßzeiten wird der relative Gesamtfehler durch die Signalfensterung, für größere Zeiten dagegen durch den Fehlergradienten größer als das Optimum.
Im Schnittpunkt ist

$$F_a = F_T . \tag{13}$$

Daraus folgt

$$T = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot A \cdot F(K)}{K}} \cdot \frac{1}{\sqrt{a f_g}} \tag{14}$$

$$F = \sqrt{\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot A \cdot K \cdot F(K)} \cdot \sqrt{\frac{a}{f_g}} . \tag{15}$$

Für $K = 0{,}95$ gilt

$$F = 0{,}810 \cdot \sqrt{\frac{a}{f_g}} ; \qquad T = 0{,}738 \cdot \frac{1}{\sqrt{a f_g}} . \tag{16}$$

Im Grenzfall $K \to 0$ gilt

$$F = 0{,}128 \cdot \sqrt{\frac{a}{f_g}} ; \qquad T = 2{,}225 \cdot \frac{1}{\sqrt{a f_g}} . \tag{17}$$

Nach (15) wird der optimal zu erreichende Fehler selbstkalibrierender Systeme im wesentlichen durch den Quotienten aus dem zeitlichen Fehleranstieg und der Grenzfrequenz des Systems bestimmt. Diese Größe ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal eines Meßsystems.
Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß nach (3) oder nach Hinzunahme von Fehlerbeiträgen, die durch Abtastung des endlichen Signals entstehen [6], sich im technisch relevanten Bereich ebenfalls Abhängigkeiten des Optimalfehlers vom Quotienten aus dem zeitlichen Fehleranstieg und der Grenzfrequenz ergeben.
Der Anstieg a setzt sich aus einem durch Alterung bestimmten Anteil a_α und aus den Einflußkoeffizienten α_i gegenüber den Störgrößen Z_i zusammen:

$$a = a_\alpha + \sum_i \alpha_i \frac{\Delta Z_i}{\Delta t_i} . \tag{18}$$

Betrachtet man die Temperatur T als Störgröße, bezieht sich auf den in der Kraftmeßtechnik üblichen maximalen Temperaturanstieg von 5 K/h und vernachlässigt die Alterung, so ist

$$a = (\alpha_0 + \alpha_y) \cdot 5/3600 \quad 1/s \tag{19}$$

mit den Temperaturkoeffizienten des Nullpunktes α_0 und des Übertragungsfaktors α_y der gesamten Meßkette.
Durch Einsetzen von (19) in (16) erhält man die für vorgegebene Grenzfrequenz und Fehler maximal zulässige Größe der Einflußkoeffizienten:

$$(\alpha_0 + \alpha_y) = 1097{,}4 \cdot F^2 \cdot f_g . \tag{20}$$

Für $f_g = 10\,s^{-1}$ und eine Auflösung von $6000d$, d. h. $F = 0{,}0167\,\%$, ergibt sich beispielsweise $(\alpha_0 + \alpha_y) = 0{,}0305\,\%/K$.
Mit einem schlechteren Meßsystem, d. h. einem System mit größeren Temperaturkoeffizienten oder/und kleinerer Grenzfrequenz läßt sich die vorgegebene Fehlergrenze auch bei automatischer Selbstkalibrierung **nicht** erreichen.
Ohne Selbstkalibrierung ergäbe sich bei diesen Temperaturkoeffizienten und einem Temperaturbereich von 60 K eine Fehlergrenze $F > 0{,}915\,\%$.

Zusammenfassung

Zur Sicherung anhaltend hoher Meßgenauigkeiten werden zunehmend Meßsysteme mit automatisch ablaufender Selbstkalibrierung eingesetzt.
Entgegen der Vermutung, daß sich mit einem solchen System beliebig kleine Fehlergrenzen erreichen lassen, wird gezeigt, daß die möglichen Fehlergrenzen von der Güte des Systems ohne Selbstkalibrierung abhängen.
Das Gütekriterium ist dabei der Quotient aus dem maximalen zeitlichen Fehleranstieg und der Grenzfrequenz.
Der maximale zeitliche Fehleranstieg entsteht aus der Alterung und der Summe der Produkte von Einflußkoeffizienten und zugehörigen maximalen Störgrößenanstiegen.
Aus der vorgegebenen Grenzfrequenz und Fehlergrenze kann die maximale Größe der Einflußkoeffizienten berechnet werden, für die die vorgegebene Fehlergrenze erreicht werden kann.
Demnach sind auch bei selbstkalibrierenden Meßsystemen Mindestanforderungen an die Qualität der Meßaufnehmer zu stellen, wenn vorgegebene Fehlergrenzen erreicht werden sollen.
Die Einhaltung dieser Mindestanforderungen ist nach wie vor durch Technologie, Abgleich und/oder automatische Korrektur, d. h. also durch „klassische" Maßnahmen, zu sichern.

Literatur

[1] Herold, H.: Kompromisse von Genauigkeit, Grenzfrequenz, Dauer und Häufigkeit bei der automatischen Selbstkalibrierung. msr, Berlin 30 (1987) 9, S. 394–397.
[2] Richter, W.: Grundlagen der elektrischen Meßtechnik. 2. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik 1988.
[3] Wagner, F. E.: Selbstkalibrierende Meßsysteme. messen + prüfen/automatik 10 (1981), S. 666–672, S. 757–761, S. 834–839.
[4] Breimesser, F.: Konzepte für Eigentests und automatische Korrekturen in Meßeinrichtungen. Technisches Messen 53 (1986) 4, S. 133 bis 137.
[5] Abramowitz, M.; Stegun, A.: Handbook of Mathematical Functions. Frankfurt/Main: Verlag Harri Deutsch 1984.
[6] Hart, H.; Lotze, W.; Woschni, E.-G.: Meßgenauigkeit. Berlin: VEB Verlag Technik 1987.

msr 8896

D. Schubert, F. Schwabe, T. Uhlig

Drucksensor mit piezoresistiven Widerständen aus polykristallinem Silizium

0. Einleitung

In der Druckmeßtechnik haben Siliziumsensoren eine hervorragende Bedeutung erlangt [1]. Seit mehr als zehn Jahren werden Silizium-Drucksensoren mit monolithisch integrierten piezoresistiven Widerständen [2] produziert und im breiten Umfang zur Druck- und Durchflußmessung genutzt. In der DDR werden entsprechende Druckmeßumformer und Präzisionsdruckwandler vom VEB Geräte- und Reglerwerke Teltow hergestellt [3].

Mit der Entwicklung neuartiger Verfahren zur Bearbeitung von Siliziumsubstraten, wie Mikromechanik und SOI (silicon on isolator)-Technologie, gerieten kapazitive Silizium-Drucksensoren und Drucksensoren mit dielektrisch isolierten piezoresistiven Widerständen in das Interesse der Sensortechniker. Eine typische Konfiguration eines kapazitiven Drucksensors [4] besitzt als erste Elektrode eine p-dotierte druckempfindliche Siliziummembran und als zweite Elektrode eine Metallschicht auf einem Glassubstrat. Im Vergleich zu piezoresistiven Drucksensoren gleicher Membranabmessungen werden wesentlich höhere Werte für die Empfindlichkeit und eine bessere Kenngrößenstabilität angegeben [4].

Durch die Entwicklung von Drucksensoren mit dielektrisch isolierten Widerständen soll ebenfalls die Kenngrößenstabilität in einem erweiterten Arbeitstemperaturbereich verbessert werden. Die SOS (silicon on saphir)-Technologie und die Herstellung vergrabener Isolatorschichten durch stöchiometrische Sauerstoff- oder Stickstoff-Implantation blieben jedoch infolge ihres hohen Aufwandes nur speziellen Anwendungsgebieten vorbehalten. Eines wesentlich geringeren Aufwandes bedarf die Herstellung von Drucksensoren durch SOI-Verfahren. Die Isolatorschichten werden dabei auf herkömmlichen Siliziumsubstraten durch eine thermische Oxydation oder die CVD-Abscheidung von Siliziumoxid- und Siliziumnitridschichten hergestellt. Die piezoresistiven Widerstände aus polykristallinem Silizium werden anschließend abgeschieden, danach strukturiert, passiviert und kontaktiert (Bild 1). Durch Vermeidung der bei monolithisch integrierten Widerständen unumgänglichen pn-Übergänge können für SOI-Drucksensoren Arbeitstemperaturen bis über 200 °C bei sehr guter Nullpunktstabilität erzielt werden [5]. Piezoresistive Widerstände aus polykristallinem Silizium haben jedoch im Vergleich zu Widerständen aus kristallinem Silizium einen um etwa den Faktor 3 geringeren Übertragungsfaktor [6] und [7]. Durch Kristallisation der polykristallinen Siliziumschichten mittels Zonenschmelz- und Laserstrahlverfahren kann der Übertragungsfaktor dem von Widerständen aus kristallinem Silizium angeglichen werden [7] und [8].

Die Untersuchung der elektrischen und dehnungsresistiven Übertragungseigenschaften dünner polykristalliner und kristallisierter Siliziumschichten begannen vor etwa fünf Jahren als Gemeinschaftsarbeit zwischen der *Technischen Universität Dresden/Sektion 9 (TUD/9)* und dem *Zentralinstitut für Kernforschung der AdW der DDR Rossendorf (ZfK)*. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden wiederholt auf den Fachkolloquien Informationstechnik vorgestellt [9] bis [11]. Von 1986 bis 1987 wurde in Zusammenarbeit zwischen dem *VEB Forschungszentrum Mikroelektronik Dresden (ZMD)*, *TUD/9* und *ZfK* die Entwicklung eines SOI-Drucksensors für einen Nenndruck von 100 kPa mit piezoresistiven Widerständen aus polykristallinem Silizium bis zur Labormusterfertigung geführt [12]. Die Entwicklungsarbeiten werden im *VEB Geräte- und Regler-Werke Teltow (GRW)* und im *VEB Mikroelektronik „Karl Liebknecht" Stahnsdorf (MLS)* weitergeführt.

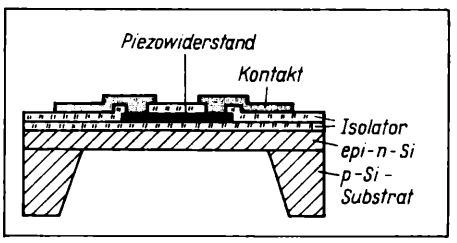


Bild 1. Vertikalstruktur eines SOI-Drucksensors

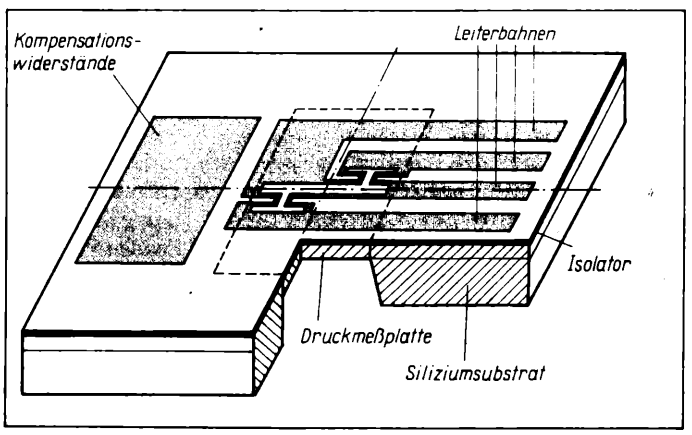


Bild 2. Anordnung der piezoresistiven Widerstände auf dem Chip des SOI-Drucksensors

1. Auslegung des SOI-Drucksensors

Das Drucksensorchip mit den Abmessungen $(5 \times 5 \times 0{,}5)$ mm³ enthält als Verformungskörper eine Siliziumrechteckplatte mit den Abmessungen $(3 \times 5 \times 0{,}03)$ mm³ und als piezoresistive Elemente U-förmige Widerstände aus polykristallinem Silizium mit einer Gesamtlänge von 440 µm und einer Breite von 30 µm (Bild 2). Der Nenndruck von $p_N = 100$ kPa ruft am Plattenrand eine maximale Dehnung von $S_{max} = 0{,}7 \cdot 10^{-3}$ hervor. Auf der Rechteckplatte sind jeweils zwei Widerstände in der Plattenmitte und am Plattenrand, d. h. im Bereich positiver und negativer Dehnung, so angeordnet, daß in linearer Näherung die Widerstandsänderung bei Druckeinwirkung paarweise entgegengesetzt gleich groß ist. Die mittlere Dehnung der Widerstände bei Nenndruck beträgt $|\bar{S}_N| = 0{,}29 \cdot 10^{-3}$. Bild 3 enthält die Definition der Widerstandskenngrößen.

Mit dem für polykristalline Widerstände unter den festgelegten Verfahrensparametern erzielbaren Übertragungsfaktor $K_L = 22$ [11] errechnet man eine mittlere Widerstandsänderung von $\bar{r} = 0{,}64 \times 10^{-3}$. Die Widerstände sind als geschlossene Vollbrücke mit einem Innenwiderstand von $R_B = 3$ kΩ verschaltet. Durch die spezielle Wahl der Verfahrensparameter zur Modifizierung des polykristallinen Siliziums kann der Temperaturkoeffizient des Widerstandes α_R im Temperaturbereich von −30 °C bis +80 °C auf Werte $|\alpha_R| < 10^{-4}\ K^{-1}$ reduziert werden. Er liegt damit um mehr als eine Größenordnung unter den Werten für Widerstände aus kristallinem Silizium gleicher Ladungsträgerkonzentration.

Dr.-Ing. DIETRICH SCHUBERT (38) studierte von 1968 bis 1973 Physik an der Martin-Luther-Universität Halle. Von 1973 bis 1979 wissenschaftlicher Assistent an der Sektion Informationstechnik der TU Dresden. Seit 1979 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf. 1980 Promotion A.

Dr.-Ing. FRIEDRICH SCHWABE (44) studierte von 1965 bis 1970 Prozeßmeßtechnik an der TH „Otto von Guericke" Magdeburg. 1972 Promotion A. Derzeit Gruppenleiter Forschung und Entwicklung im VEB Geräte und Regler-Werke „Wilhelm Pieck" Teltow.

Dipl.-Phys. THOMAS UHLIG (33) studierte von 1976 bis 1981 Physik an der TU Dresden. Von 1981 bis 1984 dort wissenschaftlicher Assistent. Seit 1984 Prozeßingenieur im VEB Forschungszentrum Mikroelektronik Dresden.

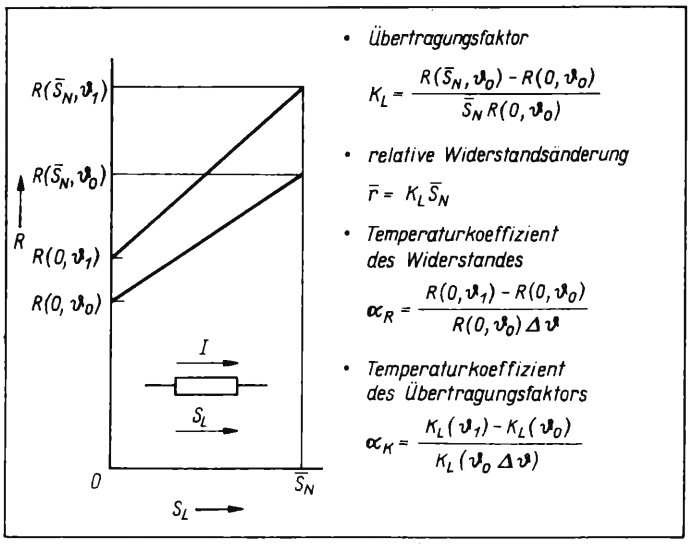


Bild 3. Festlegung der Kenngrößen der piezoresistiven Widerstände

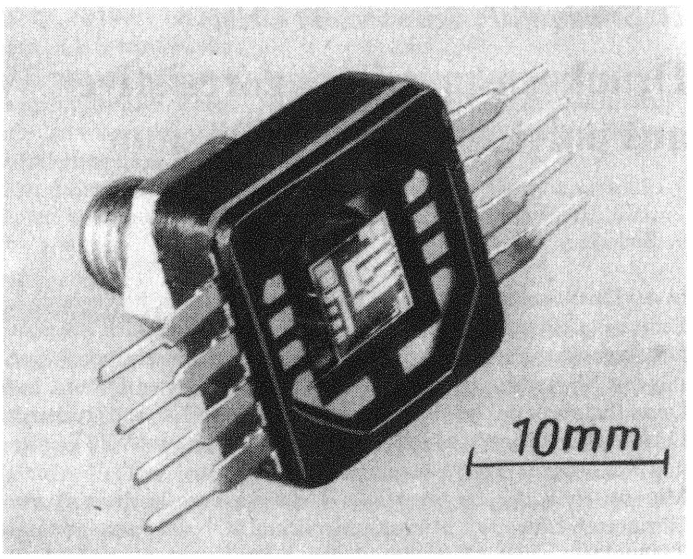


Bild 4. SOI-Druckmesser im Gehäuse SK 920

Zur Kompensation des Temperaturkoeffizienten des Übertragungsfaktors sind auf dem Sensorchip Widerstände aus polykristallinem Silizium mit negativen Temperaturkoeffizienten α_R integriert.
Die Sensorchips wurden im *MLS* durch anodisches Bonden mit einem Druckzuführungsrohr aus Glas verbunden und unter Verwendung von SK-920-Gehäusen zu Drucksensoren montiert (Bild 4).
Eine zweite Gruppe von Sensorchips wurde im *GRW* entsprechend der Montagetechnologie für Präzisionsdruckwandler [3] durch eutektisches Löten mit Siliziumsubstraten verbunden. Damit wurden Drucksensoren mit SDF-Gehäusen hergestellt.

2. Ermittlung der Kenngrößen für einen Temperaturzyklus

Die Ermittlung der Kenngrößen erfolgte im *MLS* und im *GRW* unter den für die Entwicklung konventioneller Silizium-Drucksensoren erarbeiteten Prüfbedingungen. Die im *MLS* montierten Drucksensoren wurden anschließend im *ZMD* hinsichtlich ihres Driftverhaltens weiter untersucht. Die hier verwendeten Kenngrößendefinitionen entsprechen den in [3] vorgeschlagenen Festlegungen (Bild 5).
Die mittleren Kennwerte des SOI-Drucksensors werden in Tafel 1 mit den Kennwerten eines Drucksensors für einen Nenndruck von 100 kPa mit monolithisch integrierten Widerständen (Typ: SDW 107, Entwickler: *GRW*) verglichen. Die Unterschiede für die im *GRW*, im *MLS* und im *ZMD* ermittelten Kennwerte der SOI-Drucksensoren sind auf die unterschiedlichen Gehäuse, die unterschiedlichen Prüfbedingungen und die zufällige Probenauswahl zurückzuführen. Diese Unterschiede sollen hier nicht weiter erörtert werden. Grundsätzlich kann festgestellt werden, daß trotz der unterschiedlichen Prüfbedingungen für die auf die Speisespannung bezogene Brückengrundverstimmung $|U_{a0}|/U_0$, für den Temperaturkoeffizienten des Nullpunktes α_0 und für die Drift des Nullpunktes während des Durchfahrens eines vollständigen Temperaturzyklusses (Fußpunktaufweitung) $\Delta\tilde{U}_{a0}$ im Vergleich zum Drucksensor SDW 107 wesentlich kleinere Werte erzielt werden. Vergleichsmessungen an Widerstandsbrücken auf unabgedünnten Drucksensorchips bestätigten, daß mit Widerständen aus polykristallinem Silizium im Vergleich zu monolithisch integrierten Widerständen ebenfalls um etwa den Faktor 5 geringere Werte für $|U_{a0}|/U_0$, α_0 und $\Delta\tilde{U}_{a0}$ erreicht werden können. Die Ursachen sind in einer besseren Homogenität der polykristallinen Widerstände, ihrer wesentlich geringeren Temperaturabhängigkeit und ihrer besseren dielektrischen Isolation zu suchen. Für den SOI-Drucksensor erhält man jedoch im Vergleich zum Drucksensor SDW 107 eine wesentlich geringere Nennausgangsspannung U_{aN}/U_0. Ursachen dafür sind:

— der wesentlich geringere Übertragungsfaktor K_L für Widerstände aus polykristallinem Silizium

		SOI-Drucksensor			SDW 107
Chipabmessungen		$(5 \times 5 \times 0{,}5)$ mm³			∅ 10 mm
Plattenabmessungen		$(3 \times 1{,}5 \times 0{,}03)$ mm³			∅ 6,8 mm
Widerstandsabmessungen		(440×30) µm²			(630×30) µm²
Brückeninnenwiderstand		R_B = 3 kΩ			R_B = 5 kΩ
Meßort		*ZMD*	*MLS*	*GRW*	*GRW*
Prüfbedingungen					
Gehäuse		SK 920	SK 920	SDF	Adapter
Speisung		U_0 = 5 V	U_0 = 5 V	I_0 = 0,48 mA	I_0 = 0,48 mA
Meßzeit		1 d	—	2 d	2 d
$(\vartheta_{min}, \vartheta_0, \vartheta_{max})$/°C		+10, +30, +50	−25, +30, +80	−30, +30, +80	−30, +30, +80
Probenzahl n		5	16	9	20
Kenngrößen					
$\lvert U_{a0}\rvert/U_0$	in mV/V	1,8	1,0	0,6	3,3
$\lvert\alpha_0\rvert$	in µV/V · K	2,2	1,8	0,9	7,1
$\Delta\tilde{U}_{a0}/U_0$	in µV/V	8,0	—	8,8	38,0
U_{aN}/U_0	in mV/V	6,2	6,1	4,7	32,8
$\lvert\alpha_N\rvert$	in 10^{-3}/K	0,35	0,29	0,19	0,22
α_B	in 10^{-3}/K	−1,5[1])	−1,2[1])	−1,3	+0,3
F_{DN}	in 10^{-3}	1,3	—	1,9	1,2
F_{DB}	in 10^{-3}	1,6	—	0,9	0,7
F_{lin}	in 10^{-3}	+3,5	—	−0,7	+1,5

[1]) ohne Kompensation mit monolithisch integrierten Widerständen aus polykristallinem Silizium

Tafel 1. Mittlere Werte der Kenngrößen für einen Temperaturzyklus des SOI-Drucksensors im Vergleich zum Drucksensor SDW 107 für einen Nenndruck p_N = 100 kPa

Tafel 2. Mittlere Änderung der Brückengrundverstimmung $\overline{\Delta U_{a0}}$ von SOI-Sensorchips und Drucksensoren unter verschiedenen Lagerbedingungen

Meßort	*GRW*			*ZMD*		
Bauelemente	Sensoren	Chips	Sensoren	Chips	Sensoren	Chips
Widerstände	kristallines Si	polykristallines Si	polykristallines Si	polykristallines Si	polykristallines Si	polykristallines Si
Gehäuse/Träger	SDF	frei	SDF	MK 24	SK 920	MK 24
Probenanzahl	6	8	4	4	1	4
Brückenspeisung	0,48 mA	0,48 mA	0,48 mA	5 V	5 V	5 V
Lagerbedingungen						
Temperatur	Raumtemperatur			130 °C	130 °C	200 °C
Zeit	60 d	72 d	42 d	14 d	14 d	14 d
Belastung	mit Speisestrom 0,48 mA			mit Speisespannung 5 V		
$\overline{\Delta U_{a0}}$	35 µV	11 µV	13 µV	70 µV	240 µV	210 µV
$\overline{\Delta U_{a0}}/U_{aN}$	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$	$1{,}9 \cdot 10^{-3}$	$2{,}3 \cdot 10^{-3}$	$7{,}8 \cdot 10^{-3}$	$6{,}8 \cdot 10^{-3}$

— geringere Werte für $|\bar{S}_N|$ infolge der wesentlich kleineren Abmessungen des Sensorchips und der Druckplatte des SOI-Drucksensors.
— die Vorgabe eines kleineren Wertes für S_{max} für den SOI-Drucksensor.

Damit sind die auf die Nennausgangsspannung U_{aN} bezogenen Fehlergrößen α_N, F_{DN} und F_{DB} beider Drucksensorkonfigurationen annähernd gleich.
Mit einer Belastung des SOI-Drucksensors mit $p_N = 200$ kPa konnten um etwa den Faktor 2 geringere Werte für α_N, F_{DN} und F_{DB} erreicht werden. Der Linearitätsfehler stieg dabei jedoch auf einen Wert von $F_L = 1{,}4 \cdot 10^{-3}$ und ist damit mit dem Linearitätsfehler des Drucksensors SDW 107 bei einer Belastung mit $p_N = 100$ kPa vergleichbar.
Zur Untersuchung der Kenngrößen im Temperaturbereich bis +150 °C wurde im *GRW* ein spezielles Sensorgehäuse gefertigt. Die gemessenen Fehlerwerte entsprechen den im Temperaturbereich von −30 °C bis +80 °C ermittelten Kennwerten.

3. Ermittlung der Stabilität der Kenngrößen für verschiedene Lagerbedingungen

Im *GRW* wurde mit einem Speisestrom von $I_0 = 0{,}48$ mA die Brükkengrundverstimmung U_{a0} von 11 Sensorchips und 5 montierten Drucksensoren nach einer Raumtemperaturlagerung über 78 Tage (Chips) und 48 Tage (Sensoren) erneut gemessen und die Differenz ΔU_{a0} bestimmt. Zur Auswertung wurden 8 der 11 Chips und 4 der 5 Sensoren berücksichtigt. Unter gleichen Lager- und Prüfbedingungen wurde ΔU_{a0} für 6 Drucksensoren mit monolithisch integrierten Widerständen ermittelt.
Im *ZMD* wurden 2 Drucksensoren mit SK-920-Gehäuse und 8 in MK-24-Gehäuse eingeklebte Sensorchips untersucht. Die beiden Drucksensoren und vier Sensorchips wurden 14 Tage bei einer Temperatur von 130 °C, die übrigen vier Sensorchips bei einer Temperatur von 200 °C gelagert. Während der Lagerung wurden die Brükkenwiderstände mit einer Spannung von 5 V belastet. Die Kennwertermittlung erfolgt in Temperaturzyklen zwischen 10 °C und 50 °C bei einer Speisespannung von 5 V. Vor dem Eingangstest wurden die Bauelemente bei der vorgesehenen Lagertemperatur getempert.
Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tafel 2 zusammengefaßt. Die unterschiedlichen Werte für die im *GRW* und im *ZMD* untersuchten Proben sind auf die sehr unterschiedlichen Lager- und Prüfbedingungen zurückzuführen. Für die Lagertemperatur von 200 °C wurde gegenüber 130 °C eine um den Faktor 3 größere Änderung der Brückengrundverstimmung festgestellt.
Eine zweite Versuchsreihe im *ZMD* diente der Ermittlung der Änderung der Brückengrundverstimmung U_{a0}, des Temperaturkoeffizienten des Nullpunktes α_0, der Nennausgangsspannung U_{aN} und des Temperaturkoeffizienten des Übertragungsfaktors α_B bei wiederholter Messung. Dafür wurden 5 SOI-Drucksensoren im Gehäuse SK 920 drei Monate bei Raumtemperatur gelagert und in diesem

Tafel 3. Wertebereich und mittlere Stabilitätskennwerte für fünf SOI-Drucksensoren im Gehäuse SK 920
Belastung mit zehn Temperaturzyklen im Bereich von +10 °C bis +50 °C während einer dreimonatigen Raumtemperaturlagerung

	Wertebereich für alle Sensoren	mittlere Standardabweichung der 10 Meßwerte für jeden Sensor
Brückenspeisespannung	$U_0 = 5{,}000$ V	
Brückengrundverstimmung U_{a0}	(−12,9 ... +15,3) mV	$\overline{\sigma U_{a0}} = 48$ µV $\overline{\sigma U_{a0}}/U_{aN} = 0{,}15\%$
Temperaturkoeffizient des Nullpunktes α_0	(−3,1 ... +2,9) µV/V · K	$\overline{\sigma\alpha_0} = 0{,}43$ µV/V · K
Nennausgangsspannung U_{aN}	(29,9 ... 32,2) mV	$\overline{\sigma U_{aN}} = 80$ µV $\overline{\sigma U_a}/U_{aN} = 0{,}25\%$
Temperaturkoeffizient des Nullpunktes α_N	$(-0{,}5 \ldots +0{,}5)\ 10^{-3}$/K	$\overline{\sigma\alpha_N} = 0{,}07 \cdot 10^{-3}$/K
Temperaturkoeffizient des Übertragungsfaktors α_B	$(-1{,}36 \ldots 1{,}83)\ 10^{-3}$/K	$\overline{\sigma\alpha_B} = 0{,}09 \cdot 10^{-3}$/K

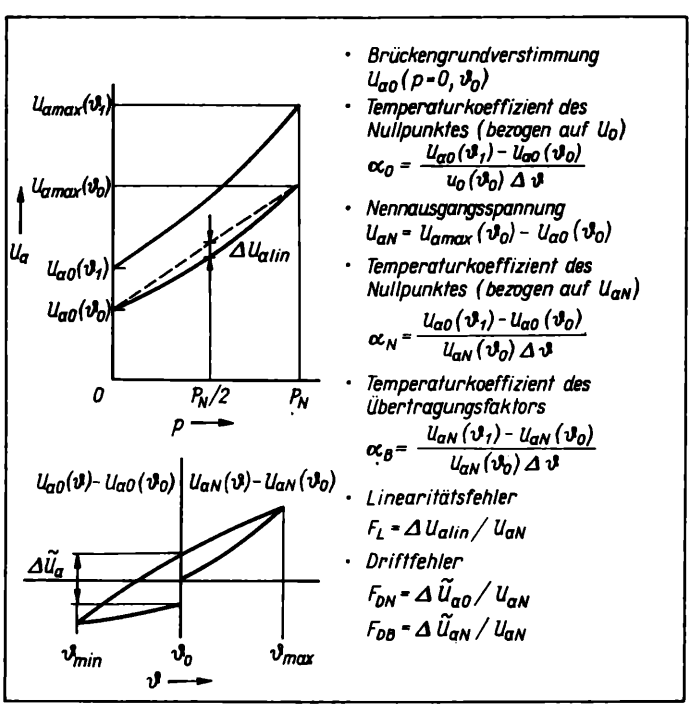


Bild 5. Festlegung der Kenngrößen für Drucksensoren

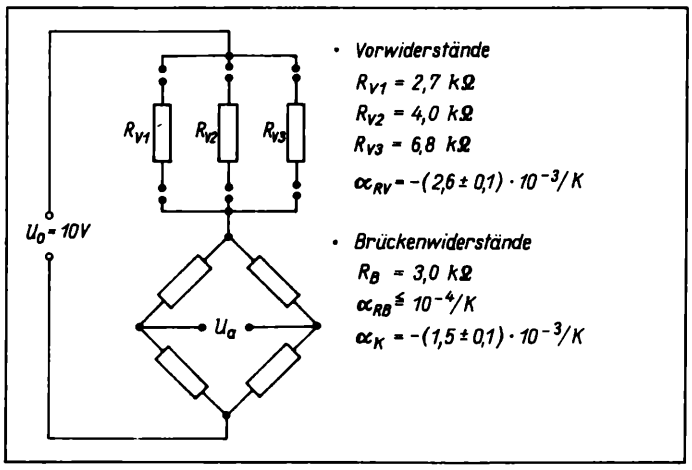


Bild 6. Kompensation des Temperaturkoeffizienten α_B durch temperaturabhängige Speisespannung

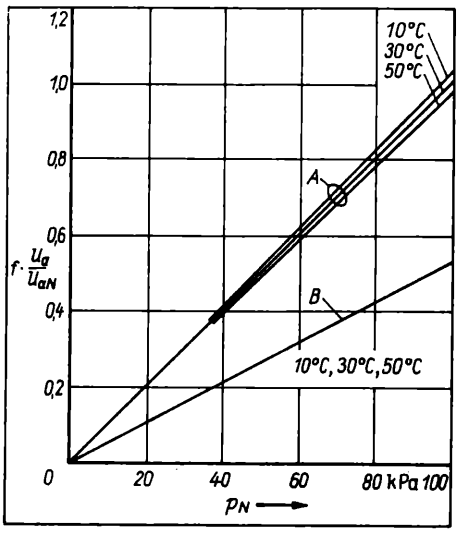


Bild 7. Kennlinien des SOI-Drucksensors für verschiedene Arbeitstemperaturen mit und ohne Poly-Si-Vorwiderstand zur Kompensation des Temperaturkoeffizienten α_B
A: ohne Vorwiderstand, $\alpha_B = -1{,}47 \times 10^{-3}/K$, $U_0 = 5$ V
B: mit Vorwiderstand $R_v = 2{,}7$ kΩ, $\alpha_{RV} = -2{,}6 \cdot 10^{-3}/K$, $\alpha_B = -0{,}13 \cdot 10^{-3}/K$, $U_0 = 10$ V
$f = 5\ V/U_0$

Tafel 4. Zusammenfassung der wesentlichen Kenngrößen des SOI-Drucksensors

Gehäuse	SK 920
Nenndruck	$p_N = 100$ kPa
Speisespannung ohne Poly-Si-Vorwiderstand mit Poly-Si-Vorwiderstand	 $U_0 = 5$ V $U_0 = 10$ V
Nennausgangsspannung	$U_{aN} = 31$ mV
TK des Nullpunktes	$\lvert\alpha_0\rvert < 0{,}5 \cdot 10^{-3}/K$
TK des Übertragungsfaktors ohne Poly-Si-Vorwiderstand mit Poly-Si-Vorwiderstand	 $\lvert\alpha_B\rvert < 2{,}0 \cdot 10^{-3}/K$ $\lvert\alpha_B\rvert < 0{,}2 \cdot 10^{-3}/K$
Driftfehler für Messung innerhalb eines Temperaturzyklus	$F_{DN} < 2 \cdot 10^{-3}$ $F_{DB} < 2 \cdot 10^{-3}$
Drift der Brückengrundverstimmung bei Lagerung (14 d, 200 °C), Sensorchipmessung	$\frac{\Delta U_{a0}}{U_{aN}} < 10^{-2}$

Zeitraum zehn Temperaturbelastungen zwischen 10 °C und 50 °C unterworfen. Bei jeweils 10 °C, 30 °C und 50 °C wurden U_{a0} und U_{aN} gemessen. Eine gerichtete Drift der Kenngrößen konnte nicht festgestellt werden. Als Stabilitätskenngröße wurde deshalb die Standardabweichung σ der zehn Meßwerte von ihrem Mittelwert gewählt. In Tafel 3 sind der Wertebereich für die Kenngrößen U_{a0}, α_0, U_{aN} und α_B und die durch eine zweite Mittelung über die 5 Meßproben errechneten mittleren Standardabweichungen $\bar{\sigma}$ angegeben.

4. Kompensation des Temperaturkoeffizienten α_B

Zur Kompensation des Temperaturkoeffizienten α_B sind auf dem Sensorchip drei unterschiedlich dimensionierte Widerstände aus polykristallinem Silizium mit negativen Temperaturkoeffizienten α_R integriert. Damit ist für Spannungsspeisung eine temperaturabhängige Steuerung der Speisespannung gemäß Bild 6 gegeben [13] und [14]. Die Kennwerte dieser Kompensationswiderstände enthält ebenfalls Bild 6. Durch Parallelschaltung der Vorwiderstände sind Werte zwischen 1,3 kΩ und 6,8 kΩ realisierbar. Mit einem Vorwiderstand von 2,7 kΩ wurde im Temperaturbereich von 10 °C bis 50 °C nachgewiesen, daß der Temperaturkoeffizient α_B von $-1{,}47 \times 10^{-3}\ K^{-1}$ auf $-0{,}13 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}$ reduziert werden kann (Bild 7).

Zusammenfassung

In Tafel 4 sind die wesentlichen Kenndaten des SOI-Drucksensors im Gehäuse SK 920 zusammengestellt. Dieser Sensor hat bei wesentlich geringeren Chipabmessungen für die Temperaturkoeffizienten α_N und α_B und die Driftfehler F_{DN} und F_{DB} Kennwerte, die etwa dem Präzisionsdruckwandler für einen Nenndruck von 100 kPa der Typenreihe **audapas** des *VEB Geräte- und Regler-Werke Teltow* [3] entsprechen. Auch unter extremen Lagerbedingungen bei einer Temperatur von 200 °C bleibt die relative Änderung der Brückengrundverstimmung $\Delta U_{a0}/U_{aN}$ unter 1 %.

Für die Ermittlung der Kennwerte von SOI-Drucksensoren im *VEB Mikroelektronik „Karl Liebknecht" Stahnsdorf* möchten sich die Autoren bei Herrn Dr. BRÜCKNER bedanken.

Literatur

[1] SCHMIDT, B.; SCHUBERT, D.: Siliciumsensoren. Berlin: Akademie Verlag 1986.
[2] LENK, A.: Entwurf und Technologie piezoresistiver Druckaufnehmer. 20. Fachkolloquium Informationstechnik, Dresden, 17. bis 19. Februar 1987, Studie MWE 3/86.
[3] LÖFFLER, F.; WERTHSCHÜTZKY, R.: Piezoresistive Drucksensoren für die Automatisierungstechnik. msr, Berlin 30 (1987) 5, S. 194—199 und 7, S. 317—321.
[4] KO, W. H.: Solid-state capacitive pressure transducers. Sensors and Actuators 10 (1986), S. 303—320.
[5] OBERMEIER, E.; VON KIENLEIN, F.: Silizium-Drucksensor für hohe Betriebstemperaturen. Tagungsunterlagen, SENSOR 85, Karlsruhe, 21. bis 23. Mai 1985.
[6] FRENCH, P. J.; EVANS, A. G. R.: Polycristalline silicon strain sensors. Sensors and Actuators 8 (1985), S. 219—225.
[7] SCHUBERT, D.; JENSCHKE, W.; UHLIG, T.; SCHMIDT, F.-M.: Piezoresistive properties of polycrystalline and crystalline silicon films. Sensors and Actuators 11 (1987), S. 145—155.
[8] BINDER, J.; HENNIG, W.; OBERMEIER, E.; SCHABER, H.; CUTTER, D.: Laser-recrystallized polysilicon resistors for sensing and integrated circuit applications. Sensors and Actuators 4 (1983), S. 527—536.
[9] SCHUBERT, D.; LORENZ, U.; JENSCHKE, W.; UHLIG, T.: Sensoren in SOI-Technologie. Tagungsunterlagen, 19. Fachkolloquium Informationstechnik, Dresden, 21. bis 23. Januar 1986, Teil 1, S. 140—145.
[10] SCHUBERT, D.; UHLIG, T.: Probleme der SOI-Technologie für Drucksensoren. Tagungsunterlagen, 20. Fachkolloquium Informationstechnik, Dresden, 17. bis 19. Februar 1987, Teil B, S. 15—18.
[11] JENSCHKE, W.; SCHUBERT, D.: Elektrische und dehnungsresistive Übertragungseigenschaften dünner polykristalliner Siliziumschichten. Tagungsunterlagen, 20. Fachkolloquium Informationstechnik, Dresden, 17. bis 19. Februar 1987, Teil B, S. 19 bis 22.
[12] SCHUBERT, D.; UHLIG, T.: Drucksensor mit dielektrisch isolierten piezoresistiven Widerständen. Tagungsunterlagen, 3. Fachtagung Mikroelektronik — Technologie — Applikation, Karl-Marx-Stadt, 20. bis 22. Oktober 1987.
[13] WERTHSCHÜTZKY, R.: Entwurf und Realisierung integrierter piezoresistiver Druckwandler. Dissertation B, TU Dresden, Sektion 9, 1982.
[14] EHRLER, G.: Austauschbarer, temperaturkompensierter Drucksensor auf Polysilizium-Basis. Tagungsunterlagen, SENSOR 85, Karlsruhe, 21. bis 23. Mai 1985.

msr 8882

C. Hamann

Sensoren mit organischer Komponente

0. Einleitung

Die Wende von den achtziger zu den neunziger Jahren ist auch durch eine stürmische Entwicklung der Sensorik gekennzeichnet. Als Ursachen für das außergewöhnliche Tempo, mit dem sich neue Anwendungsgebiete eröffnen, können angesehen werden: der Intensivierungsprozeß und der Stand der Mikro- und Optoelektronik, der Automatisierungslösungen, der Robotertechnik, der Biotechnologie und der Medizin. In der DDR haben die jetzt schon erreichten Fortschritte bei der Anwendung von Sensoren vielen Mut gemacht, im eigenen Verantwortungsbereich nach Anwendungsmöglichkeiten zu suchen. Hinzu kommt, daß viele Produktionsprozesse, vor allem in der Chemie, Pharmazie, Land- und Nahrungsgüterwirtschaft, bisher nur diskontinuierlich und mit hohem Arbeitskräfteaufwand überwacht werden und daß die Industrieländer vor einer Fülle von Problemen stehen, die den Umweltschutz und die Umweltüberwachung betreffen.

Organische Stoffe der unbelebten und belebten Natur haben sich in der Sensorik einen festen Platz erobert. Sie bringen auf dem Gebiet der Biosensoren, chemischen Sensoren, Gassensoren und Feuchtesensoren einen wesentlichen Beitrag ein, der zur Zeit ständig wächst. Die enorme qualitative Breite wird daraus ersichtlich, daß physikalische Größen, wie Druck, Temperatur, Kraft, Strahlung, Spannung, Beschleunigung, Abstand, Strömung usw., zwar vielfältige Sensorlösungen erfordern, daß aber ihre Anzahl die Größenordnung 100 nicht überschreitet, während z. B. die medizinisch wichtigen Verbindungen, die es im Prinzip nachzuweisen gilt, in ihrer Anzahl um Größenordnungen darüber liegen (man denke vor allem an Antikörper, Antigene, Pharmaka, Stoffwechselprodukte oder Hormone). Aufbauend auf dem schon erreichten Stand wird eingeschätzt, daß Sensoren unter Nutzung eines Wirkprinzips eines organischen Stoffes in vielen Bereichen den Anforderungen an Empfindlichkeit, Selektivität, Reversibilität und Reproduzierbarkeit besonders effektiv entsprechen können. Ihr Einsatz hat begonnen und wird in großem Umfang weiter vorbereitet: im medizinisch-klinischen Bereich (Patientenüberwachung, Intensivstation, Drogennachweis, künstliche Niere, Blutuntersuchung, Kontrolle der Immunreaktion, Organimplantate, Prothesen), im militärischen Bereich (chemische und biologische Waffensysteme), im Bereich Industrie und Umwelt (Abwasser, Abgas, Smog, Arbeitsschutz, explosive Gase, toxische Stoffe, Bodenanalyse), in der Land- und Forstwirtschaft sowie der Nahrungsgüterwirtschaft (Produktfeuchte von Getreide, Heu, Butter, Kaffee, Fleisch, Wurst, Käse usw., Frischhaltung, Überwachung von Fermentations- und Brauprozessen, Pflanzenwachstum und Pflanzenschutz), bei der Schaffung von Geräten mit Geschmacks- oder Geruchssinn.

Es ist selbstverständlich falsch, zu erwarten, daß alles Gewünschte auch lösbar oder daß der hier erfaßte Typ von Sensoren problemlos wäre. In diesem Zusammenhang sei nur auf Probleme aufmerksam gemacht, wie: die weit geringere thermische und chemische Stabilität organischer Stoffe (insbesondere der mit biologischem 'Ursprung) gegenüber Metallen, Oxiden oder Keramik, die biologische (Un)Verträglichkeit bei Implantationen, die oft sehr kleinen Stückzahlen, die benötigt werden (< 10000/Jahr), das Zusammenspiel komplizierter Wirkprinzipien mit der Mikroelektronik und Optoelektronik, die ungelösten Fragen der Sterilisation!

Prof. Dr. sc. nat. CLAUS HAMANN (53) studierte von 1954 bis 1960 Physik und Kerntechnik an der TH Dresden. Von 1960 bis 1969 Mitarbeiter am Institut für angewandte Physik der Reinststoffe der AdW der DDR in Dresden (jetzt Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung). 1966 Promotion A, 1970 Promotion B. Seit 1969 an der Sektion Physik/Elektronische Bauelemente der TH (jetzt TU) Karl-Marx-Stadt. 1971 Berufung zum o. Professor für Festkörperphysik. Gegenwärtig Stellvertreter des Sektionsdirektors für Forschung.

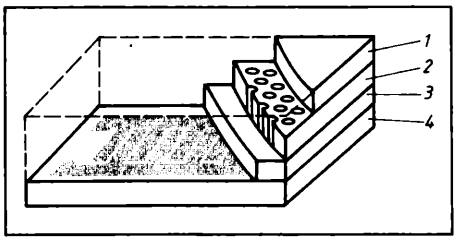


Bild 1. Prinzip des Feuchtesensors
Feuchteaufnehmende Deckschicht (1), metallische Siebschicht (2), feuchteaufnehmendes Dielektrikum (3), Substrat mit Kammelektroden (4)

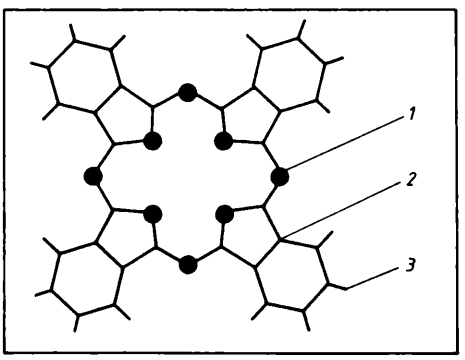


Bild 2. Phthalocyaninmolekül: $C_{32}H_{16}N_8$
Stickstoff (1), Kohlenstoff (2), Wasserstoff (3)

1. Feuchtesensoren

Wasser ist vielleicht das von der Anwendungsbreite her wichtigste Medium, das es in den unterschiedlichsten Materialien nachzuweisen gilt. Zur Lösung dieses Problems gibt es eine große Anzahl seit langem zuverlässig arbeitender Meßsysteme. Eine weitere sinnvolle Entwicklung bei Feuchtesensoren vollzieht sich allerdings deshalb, weil ökonomischere Lösungen durchaus wünschenswert sind. Ein einfacher und zuverlässiger Sensortyp wurde für den Nachweis von Luftfeuchte und Schüttgut unter Verwendung von Polymerschichten gefunden, die reversibel Wasser aufnehmen. Die Wasseraufnahme korreliert exakt mit der relativen Feuchte der Umgebung. Das feuchte Medium muß nicht unbedingt ein Gas sein. Eine korrelierte Wasseraufnahme läßt sich auch bei Medien, wie organischen Lösungsmitteln oder Treibstoff, feststellen. Schon an diesem Beispiel läßt sich zeigen, daß die mikroelektronischen Meßprinzipien heute bereits im wesentlichen ausreichen, um das Meßsignal für die Weiterverarbeitung zuverlässig zur Verfügung zu stellen. Dabei ändert das in den Polymerfilm aufgenommene Wasser deutlich die Dielektrizitätskonstante und damit die Sensorkapazität. Diese Veränderung läßt sich z. B. mit dem an der TU Karl-Marx-Stadt entwickelten mikrorechnerkompatiblen kapazitiven Sensorsystem sehr gut verarbeiten. Bild 1 zeigt das Prinzip des Feuchtesensors. In [1] bis [8] sind weitere Hinweise zu finden. Versuche, die Widerstandsänderung organischen Materials als Wirkprinzip zu nutzen, sind bei weitem nicht so effektiv wie die kapazitive Messung. Kostengünstige Lösungen bei der Sensorpräparation entstehen vor allem durch Technologien der Elektrodenabscheidung mit Siebdrucktechnik, mit Hilfe lithographischer Verfahren oder durch Aufdampfen der Elektroden, gekoppelt mit nachträglicher Laserstrukturierung, sowie durch Anwendung der produktiven Glimmpolymerisation für die Abscheidung der Polymerschicht [9].

2. Gassensoren

Schon vor Jahrzehnten wurde entdeckt, daß organische Halbleiter ihren Widerstand ändern, wenn reduzierende oder oxidierende Gase auf sie einwirken [10]. Das trifft auf monomere Substanzen, insbesondere die Phthalocyanine (Bild 2), und halbleitende Polymere (Bild 3) gleichermaßen zu. Sehr erfolgreiche Wege zeichnen sich beim Nachweis von Stickoxiden des Typs NO_x ab. Dabei handelt es

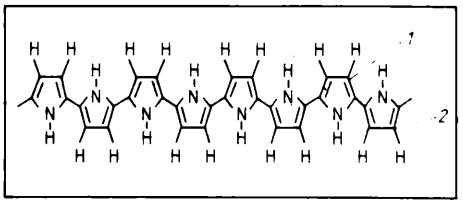


Bild 3. Polypyrrolstruktur
Typisch für leitfähige Polymere ist eine durchgehende Kette von periodisch wechselnden Einfach- und Doppelbindungen; Doppelbindung (1), Kohlenstoff (2)

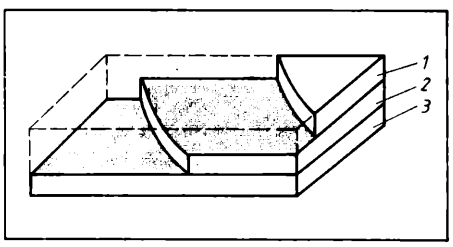


Bild 4. Prinzip des Gassensors
Phthalocyanin- oder Polypyrrolschicht (1), Substratschicht mit Kammelektroden (2), Substrat mit Widerstands-Mäander zum Heizen (3)

sich um ein Umweltgas, das für Waldschäden entscheidend mitverantwortlich ist. Dieses Gas, ein Gemisch vor allem aus NO_2 und N_2O_4, läßt sich sehr selektiv mit Hilfe der Bleiverbindung des Phthalocyanins (PbPc) durch die Widerstandsänderung eines auf etwa 150 °C erhitzten polykristallinen Films nachweisen. Der Nachweisbereich erstreckt sich bis ins ppb-Gebiet. Die international geltenden Höchstkonzentrationen, die am Arbeitsplatz zulässig sind, können sicher erfaßt werden. Den Aufbau des Sensors zeigt prinzipiell Bild 4. Zur Zeit gibt es Bemühungen, verschiedene Typen von Phthalocyanin-Metall-Komplexen als Sensorschichten einzusetzen. Im einzelnen sind das vor allem PbPc [11] und [12], CoPc [13], CuPc [14] sowie metallfreies H_2Pc [13] und [15]. Bei weiterem Fortschreiten dieser Arbeiten entsteht die Möglichkeit, Sensorsysteme, auch in Kombination mit anderen Gassensoren, zu entwickeln, die eines Tages eine umfassende Gasanalyse der oxidierenden und reduzierenden Bestandteile der Luft zulassen werden. Die in Kombination mit Phthalocyaninen angewandten Sensorgrundtypen sind die Kammelektrode [11], der Feldeffekttransistor [12] und [14] und potentiometrische Elektroden [13].

Ein sehr erfolgversprechender Weg ist auch durch die Anwendung halbleitender und leitender Polymere, wie Polypyrrol, gegeben [16]. Wie bei Nutzung der Phthalocyanine können die Betriebstemperaturen der Sensoren von typisch 400 bis 800 °C bei Oxid-Halbleitern (TiO_2, SnO_2) auf 150 °C gesenkt werden. Das bringt wesentliche Vorteile, wenn es um die Entwicklung batteriegetriebener Geräte geht. Erste erfolgversprechende Resultate liegen bei Polypyrrol-Widerstandssensoren für den Nachweis von NO_x und NH_3 vor [16].

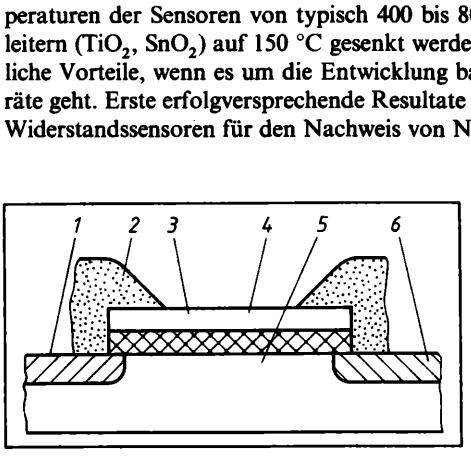


Bild 5. Prinzip des Chem-FET
Drain (1), Epoxidharz (2), Membran (3), Oxidschicht (4), Siliziumsubstrat (5), Source (6)

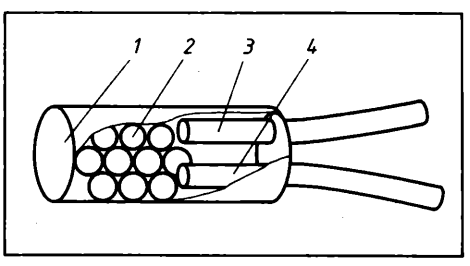


Bild 6. Prinzip des faseroptischen Sensors
Permeable Membran (1), Polymerkügelchen mit Farbstoff (2), Faser für Lichteintritt (3), Faser für Lichtaustritt (4)

Zu Problemen der Gassensorik mit Polymerschichten findet man noch weitere Angaben in [17] bis [21]. Substanzen, die besonders favorisiert sind, sind Poly-Fluor-Aluminium-Phthalocyanine [17], Polymer-Komposite mit Graphit [18], Polypyrrol [19] und [20] und Polythiophen [19]. Interesse besteht für den Nachweis eines beachtlichen Spektrums von organischen Gasen. In [19] erfolgte die Prüfung der Sensorfunktion für 27 organische Lösungsmittel.

3. Ionenselektive Glaselektroden mit organischer Membranschicht

Organische Schichten werden bei herkömmlichen Glaselektroden vor allem als selektive Membranen benutzt, die spezifisch ionenleitend sind. Materialien dafür sind Ionenaustauscher, Zelluloseacetat, Polyvinylchlorid, Polyethylen-Komposite u. a. In einem Bericht der Tokio University zur Problematik „Grundlagenforschung zu Halbleitersensoren mit organischer Membran" wurde 1985 eingeschätzt, daß für das Aufbringen dieser Membranen das Verfahren der Glimmpolymerisation die besten Voraussetzungen bietet. Hierbei wurde die Substanz Metachrolein als besonders aussichtsreich gekennzeichnet. In [22] bis [24] sind detaillierte Angaben zur Beschichtung von Elektroden und zu den Eigenschaften der Sensoren gegeben.

4. Chem-FETs mit organischer Komponente

Feldeffekttransistoren spezieller Bauart mit offenem Gate-Bereich können als chemisch-analytische Sensoren vielseitig eingesetzt werden [25] bis [27]. Auch hier dienen organische Polymerschichten als ionenselektive Membran (z. B. für J^-, K^+, Na^+, Cl^-, F^-). Zusätzlich aufgebrachte Schichten mit katalytischer Wirkung gestatten es, größere Moleküle anhand der bei deren katalytischer Zersetzung entstehenden Ionen oder Gase nachzuweisen (Katalyse-FETs). Den prinzipiellen Aufbau eines Chem-FETs zeigt Bild 5. Eine spezielle Form stellen die SIM-FETs dar, die eine geteilte Gate-Elektrode besitzen. Beide Gate-Elektroden werden mit einer organischen Substanz beschichtet, deren Impedanz durch selektiv adsorbierte Gase verändert wird. Diese Impedanzänderung wird durch den Feldeffekttransistor verstärkt und angezeigt.

5. Optische Sensoren mit organischem Wirkprinzip

Bei den optischen Sensoren [28] und [29] beobachtet man eine Renaissance alter Prinzipien (Emission, Adsorption, Raman-Streuung, Photometrie) und die Einführung neuer Prinzipien. Tendenziell kommt es bei der Weiterentwicklung dieser Sensoren zur teilweisen Ablösung ortsgebundener teurer Großgeräte, die bisher Spezialisten zu ihrer Bedienung erforderlich machen.

Faseroptik-Sensoren werden im bedeutenden Umfang für medizinische Anwendungen entwickelt (pH-Wert, Blutdruck, Blutgas-Partialdrücke). Das Bauprinzip umfaßt die Ein- und Auskopplung von Licht über Lichtleitfasern bei sehr kleinen Außenabmessungen von 0,3 mm Durchmesser des gesamten Sensors, die Verwendung selektiv permeabler Membranen und von mit organischem Farbstoff (z. B. Phenol-Rot) versetzten Polyacrylamid-Kügelchen innerhalb des röhrchenförmigen eigentlichen Sensorkörpers (Bild 6). Der reversible Farbumschlag des organischen Farbstoffs wird als Meßgröße für die Sensorfunktion genutzt. Außerdem werden auch die Fluoreszenz und Chemolumineszenz organischer Stoffe als Wirkprinzip einbezogen. Als eine spezielle Form der Ellipsometrie kann das Prinzip der Lichtreflexions-Sensoren eingestuft werden. Die Veränderung der Reflexion von polarisiertem Licht in Brewster-Geometrie einer Schicht wird genutzt, um chemische Reaktionen nachzuweisen. Noch günstiger, weil empfindlicher, ist es, SPR-Sensoren (Surface-Plasmon-Resonanz) für den Nachweis von Anästhesiegasen zu verwenden. Farbumschlag-Sensoren zum Nachweis von sauren bis basischen Gasen sind auf der Basis von Seltenerd-Diphthalocyaninen entwickelt worden [28] und [29].

6. Anwendung weiterer Wirkprinzipien für Sensoren mit organischer Komponente

In der Literatur bemerkt man jetzt auch häufig Arbeiten, die die piezo- und pyroelektrischen Effekte von Polyvinylidendifluorid-Folien für Sensorzwecke ausnutzen. Bekannt geworden sind PVDF-Sensoren zum Nachweis von Druckänderungen, Schall- und Ultraschall, zur Messung von Laserimpulsen, in ihrer Eigenschaft als Feuerwarnsensoren, als Annäherungssensoren und zur Messung von Abkühlvorgängen. Besonders interessante Ergebnisse liegen zu Ultraschall-Bildwandlern vor [30].
Kombinationen aus organischen Halbleitern monomerer und polymerer Art werden in Form von Solarzellen vom Schottky-Typ bzw. in p-n-Konfiguration als Sensoren benutzt. Dabei wird die spezifische Änderung der Solarzellen-Parameter unter dem Einfluß von Gasen für Sensorzwecke genutzt. Auch das umfangreiche Spektrum der Oberflächenwellen-Sensoren (Surface Acoustic Wave) wird in Verbindung mit organischen dünnen Schichten, die spezifisch Gase aus der Umgebung adsorbieren, als Gas-Sensoren benutzt [31].

7. Biosensoren

Die zuvor für organische Monomere und Polymere erläuterten Prinzipien ihrer Verknüpfung mit Elektrodensystemen, Halbleiter-Bauelementen, optoelektronischen Bauelementen und akustoelektronischen Geräten läßt sich auch auf biologisches Material (Enzyme, Antikörper, biologische Membranen, Tiergewebe, Pflanzengewebe, ganze Mikroorganismen) anwenden. Um eine entsprechende Haftung auf der Sensoroberfläche zu erreichen, müssen diese Materialien gesondert immobilisiert, d. h. mit Hilfe geeigneter polymerer Schichten verankert, werden. Das derzeitige „Arbeitspferd" unter den Biosensoren sind die Enzymelektroden, aber es zeichnet sich ab, daß sich künftig eine Verknüpfung mikroelektronischer Strukturen mit biologischem Material zum Biochip vollziehen wird. Charakteristisch sind ein starker Drang zur Miniaturisierung bis in den Mikrometerbereich, die Übernahme von Teilschritten der Mikroelektronik auch zur Präparation biologischer Schichten und Versuche, Sensoren-Arrays zu präparieren. Ein besonderer Trend geht dahin, Biosensoren als Wegwerfsensoren zu entwickeln. Ihr Einsatz umfaßt heute schon den Nachweis von Kohlehydraten, Aminosäuren, Penicillin, Zitronensäure, Glukonsäure, Glucose, Harnstoff, Lactose, Maltose, Glutamat, Lactat, Harnsäure, Kreatinin, Saccharose u. a.
Das weite Feld der biotechnologischen Verfahren und der Immunreaktionen befindet sich bezüglich der Sensorentwicklung voll im Fluß. Allen Biosensoren liegt zugrunde, daß bestimmte Reaktionen auf molekularem Niveau (z. B. zwischen Enzym und Analyt, zwischen Antikörper und Antigen) außerordentlich spezifisch ablaufen. Einer ihrer Hauptvorteile liegt darin, daß sie in wäßrigem Milieu arbeiten können und eine vorherige Auftrennung komplizierterer Gemische (Blut, Serum, Urin, Reaktionsgemische in Biofermentatoren) nicht erforderlich ist [32] bis [37].

Zusammenfassung

Die nahezu unerschöpfliche Fülle organischer Stoffe der unbelebten und belebten Natur hat ihren Einzug in die Sensorik vollzogen. Durch die sinnvolle Integration elektronischer, mikroelektronischer und optoelektronischer Sensorgrundstrukturen mit Schichten und Schichtsystemen organischer Halbleiter, Leiter, Membranen sowie biologischer Moleküle entstehen Lösungen, die für eine Anwendung in der Industrie, in der Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft, im Gesundheitswesen, im Umweltschutz u. a. Bereichen von Interesse sind.

Literatur

[1] Sakai, Y.; Sadaoka, Y.: Moisture sensitive devices. Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 60, 177, 254, 11. Sept. 1985.
[2] Hokuriku Electric Industry: Ionene polymer-based moisture sensors. Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 60, 113, 140, 19. Jun. 1985.
[3] Toya Soda Mfg. Co.: Moisture sensitive resistor. Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 60, 82, 951. 11. Mai 1985.
[4] Toyo Soda Mfg. Co.: Humidity-sensitive resistors. Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 60, 82, 950, 11. Mai 1985.
[5] Zolyan, T. S.: Sensor for the moisture content of gases. U.S.S.R. SU 1, 249, 423, 7. Aug. 1986.
[6] Miyoshi, S.; Hijikigawa, M.: Resistance-variation moisture sensors. UK 8521310, 27. Aug. 1985.
[7] General Signal Corp.: Fast response capacitance humidity sensor. US 4, 564—882 A, 16. Aug. 1984.
[8] Hamann, C.; Kampfrath, G.; Stöhr, R.; Wildner, O.: Investigations of ISFETs and thin film moisture sensors. Tagungsband: Sensors and their applications, Southampton 1985, S. 15; Kampfrath, G.; Baumgärtel, J.: Feuchteempfindliche Plasmapolymerschichten. Potsdamer Forschungen B, 52 (1987) S. 32—35.
[9] Hamann, C.; Kampfrath, G.: Glow discharge polymeric films: preparation, structure, properties and applications. Vacuum 34 (1984) 12, S. 1053—1059.
[10] Meier, H.: Organic Semiconductors. Weinheim: Verlag Chemie 1974.
[11] Bott, B.; Jones, T. A.: Multi-sensor systems in hazard monitoring. Analytical Proceedings 23 (1986) 2, S. 61 und 62.
[12] Burr, P. M.; Jeffery, P. D.: A Gas-sensitive field effect transistor utilizing a thin film of lead phthalocyanine as the gate material. Thin Solid Films (1987), S. L111—L113.
[13] Ogura, K.; Yamasaki, S.: Electroreduction of nitric ocide to ammonia at chemically modified electrodes. J. Appl. Electrochem. 15 (1985), S. 279—284.
[14] Ross, J. F.; Terry, C. I.; Webb, B. C.: A new method for protection against electrical overheating using sacrificial coating and a CHEMFET gas sensor. J. Phys. E: Sci. Instrum. 19 (1986), S. 536—540.
[15] Wilson, A.; Collins, R. A.: Gas-surface reactions on phthalocyanine thin films. Phys. stat. sol. (a) 98 (1986), S. 633.
[16] Miasik, J. J.; Hooper, A.; Moseley, P. T.; Tofield, B. C.: Electronically conducting polymer gas sensors. Conducting Polymers, Dordrecht/Boston/Lancaster/Tokyo: D. Reidel Publishing Comp. 1987, S. 189—198.
[17] Berthet, G.; Blanc, J. P.; Germain, J. P.; Larbi, A.; Malleysson, C.; Robert, H.: Electroactive polymers in thin layers: a potential application as gas sensor. Synthetic Metals 18 (1987), S. 715—720.
[18] Lundberg, B.; Sundquist, B.: Resistivity of a composite conducting polymer as a function of temperature, pressure and environment: Applications as a pressure and gas concentration transducer. J. Appl. Phys. 60 (1986) 3, S. 1074—1079.
[19] Persaud, K. C.; Pelosi, P.: An approach to an artificial nose. Trans. Am. Soc. Artif. Intern. Organs XXXI (1985) S. 297—300.
[20] Josowicz, M.; Janata, J.: Electrochemical and ultra-violet visible spectroelectrochemical investigation of selectivity of potentiometric gas sensors based on polypyrrole. Anal. Chem. 59 (1987), S. 253—258.
[21] Kita, H.; Kato, Y.: Gas sensors. Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 61, 03, 040, 9. Jan. 1986.
[22] Espenscheid, M. W.; Ghatak-Roy, A. R.; Moore, R. B. u. a.: Sensors from polymer modified electrodes. J. Chem. Soc. Faraday Trans. 82 (1986) 1, S. 1051—1070.
[23] Foos, J. S.; Erker, S. M.: Rate enhancement in modified polypyrrole electrodes. J. Electrochem. Soc.: Accel. brief comm. 82 (1986) 9, S. 1983—1984.
[24] Neumann, G.; Rübner, J.: Polyurethanfolien für die Herstellung von membranbedeckten Sauerstoffsensoren. Plaste und Kautschuk 33 (1986), S. 129—132.
[25] Wildner, O.; Bogdanova, N.: Theoretische Grundlagen beim Einsatz von ionensensitiven Feldeffekttransistoren. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 27 (1985) 2, S. 283—288.
[26] Nicklaus, E.: Dünne Schichten in der Sensortechnik der chemischen Produktion. Firmenschrift Bayer AG 1985.
[27] Sibbald, A.: Recent advances in field-effect chemical microsensors. J. Molecular Electronics (1986) 2, S. 51—83.
[28] Jackson, D. A.; Jones, J. D. C.: Fibre optic sensors. Optica Acta 33 (1986) 12, S. 1496—1503.
[29] Kist, R.: Faseroptische Sensoren auf dem Weg zur industriellen Anwendung. Fraunhofer-Institut Freiburg.
[30] Matsuo, M.: Detecting element for basic gas. Jp. Kokai Tokkyo Koho JP 57, 93, 253, 10. Jun. 1982.
[31] Matsuo, M.: Detecting element of gaseous hydrogen chloride. Jpn. Kokai Tokkyo Koho JP 57, 94, 652, 6. Dez. 1982.
[32] Danz, R.: Neue Sensormaterialien aus Polymerfolien. Wissenschaft und Fortschritt 36 (1986) 6, S. 139—142.

(Fortsetzung auf S. 348)

F. Dettmann, U. Loreit, S. Linke, P. Pertsch

Magnetoresistive Sensorelemente

0. Einleitung

Die Aufgaben zur Messung, Steuerung und Regelung von Größen und Prozessen gewinnen in Produktion und Forschung ständig an Bedeutung. Eine Grundvoraussetzung für ihre Bewältigung ist die Bereitstellung geeigneter Sensorelemente für die Erfassung der unterschiedlichsten Parameter. Unter den verschiedenen Sensortypen zeichnen sich magnetische Bauelemente durch ihr berührungsloses und damit verschleißarmes Meßprinzip, ihre Zuverlässigkeit unter rauhen Einsatzbedingungen und ihre vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten aus.

Letztere ergeben sich dadurch, daß eine ganze Reihe von Meßgrößen mit relativ einfachen Mitteln in ein auf das Sensorelement wirkendes Magnetfeld umgewandelt werden kann. Die Palette der bekannten Magnetfeldsensoren wird durch die in den letzten Jahren zur industriellen Reife entwickelten magnetoresistiven Sensorelemente (MR-Sensoren) bedeutend erweitert und ergänzt. Mit nachweisbaren magnetischen Flußdichten im Bereich Nanotesla bis Millitesla schließen sie unmittelbar an die bei stärkeren Feldern eingesetzten Hall-Sensorelemente an. Magnetoresistive Sensorelemente werden z. B. neben der Messung von Gleich- und Wechselfeldern auch für den potentialfreien Nachweis von Gleich- und Wechselströmen und in Kombination mit ferromagnetischen Konstruktionselementen zur Erfassung von Positionen, Winkeln und Drehzahlen eingesetzt [1].

Im Beitrag werden Aufbau und Funktionsweise magnetoresistiver Sensorelemente erläutert. Weiter werden einige wichtige Einflußgrößen auf die Sensorelementparameter zusammengestellt, die bei der Konstruktion kompletter Sensoren zu berücksichtigen sind. Schließlich werden die Kennwerte eigener Entwicklungsmuster angegeben.

Dr. sc. nat. Fritz Dettmann (50) studierte von 1958 bis 1963 an der TU Dresden Physik. Danach bei Robotron Dresden tätig. 1971 Promotion A mit einer Arbeit über das Schaltverhalten supraleitender Bauelemente. Seit 1973 Oberassistent an der Sektion Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Arbeitsgebiet: Josephson-Effekt und seine Anwendung für hochempfindliche Magnetfeldsensoren. Dazu 1981 auch Promotion B. Ab 1986 im Schichttechnikum mit magnetoresistiven Sensoren beschäftigt.

Dipl.-Phys. Uwe Loreit (39) studierte von 1968 bis 1973 an der FSU Jena, Sektion Physik. Danach in den Keramischen Werken Hermsdorf im Betrieb Mikroelektronik tätig (Einsatz von Chips in Hybridschaltkreisen). Ab 1978 im Schichttechnikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena (Zyklus-2 für Chipbauelemente). Seit 1984 mit der Herstellung und Applikation von magnetoresistiven Sensoren beschäftigt.

Dr. rer. nat. Stephan Linke (34) studierte von 1972 bis 1977 an der FSU Jena. 1982 Promotion über den Einfluß der Realstruktur auf die Eigenschaften schwach supraleitender Verbindungen. Danach im Schichttechnikum der Friedrich-Schiller-Universität, Arbeitsgebiet Darstellung und Charakterisierung dünner Schichten, tätig. Seit 1985 mit der Präparation magnetoresistiver Sensoren befaßt.

Dr. rer. nat. Peter Pertsch (48) studierte von 1961 bis 1966 an der FSU Jena, Sektion Physik. Danach mit Fragen der Dünnschicht-Technologie der Hybrid- und Supraleitungselektronik beschäftigt. 1975 Promotion A. Seit 1977 Leiter der Arbeitsgruppe Schichttechnikum der Sektion Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

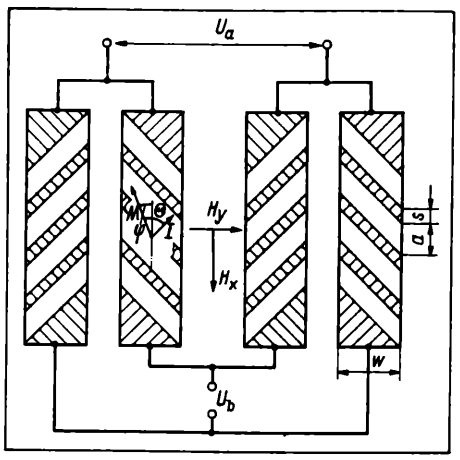


Bild 1. Schematische Darstellung der Sensorstruktur
Θ Winkel zwischen Stromrichtung I und Magnetisierungsrichtung M; φ Winkel zwischen Magnetisierungs- und Streifenlängsrichtung

1. Aufbau und Funktionsweise magnetoresistiver Sensorelemente

MR-Sensoren nutzen die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes dünner, magnetisch anisotroper Schichten $\varrho(H)$ vom Winkel zwischen Strom und Magnetisierung aus [2]. Stimmen die Richtungen von Strom und Magnetisierung überein, so erreicht $\varrho(H)$ sein Maximum, bei einem Winkel von 90° tritt der um $\Delta\varrho$ geringere Minimalwert auf. Die Widerstandsänderung liegt im Bereich weniger Prozent. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau eines MR-Sensors in Brückenschaltung. Die vier magnetoresistiven Schichtstreifen sind in Längsrichtung magnetisiert (x-Achse). Wirkt senkrecht dazu (y-Achse) ein zu messendes Magnetfeld H_y ein, so wird die Magnetisierung der Streifen aus ihrer ursprünglichen Richtung um einen Winkel φ herausgedreht, und es tritt eine Widerstandsänderung auf. Durch Leitschichtstreifen geringen Flächenwiderstandes, die um den Winkel α gegen die Längsrichtung der magnetoresistiven Streifen geneigt sind, wird dafür gesorgt, daß der durch Anlegen der Betriebsspannung U_B fließende Strom bis auf Abweichungen in Randbereichen in eine Richtung fließt, die um den Winkel (90° − α) gegen die x-Achse gedreht ist. Die magnetoresistiven Streifen haben die Breite w und die Länge l. Der Abstand der Leitschichtstreifen in x-Richtung ist a, ihre Breite in dieser Richtung ist s. Die Dimensionierung von w, a und s beeinflußt die Stromrichtung an den Streifenrändern und bestimmt so die Abweichung δ der mittleren Stromrichtung gegen den Winkel (90° − α). In Längsrichtung der magnetoresistiven Streifen kann ein Stabilisierungsfeld H_x angelegt werden, damit nach Abschalten des Meßfeldes H_y die Magnetisierung vollständig in ihre ursprüngliche Lage zurückkehrt und so Hysterese vermieden wird.

Der Widerstand eines magnetoresistiven Schichtstreifens mit Leitschichtstreifen (α = 45°) kann nach [3] bestimmt werden zu

$$R_S = \frac{l}{w \cdot t} \cdot \frac{a}{a+s}\,\varrho(H) \cdot k\left(\frac{a}{w}\right), \qquad (1)$$

(Fortsetzung von S. 347)

[33] Ricco, A. J.; Martin, S. J.; Zipperian, T. E.: Surface acoustic wave gas sensor based on film conductivity changes. Sensors and Actuators 8 (1985), S. 319—333.

[34] Autorenkollektiv: Biosensoren. Hard and Soft, Okt. 1987. Fachbeilage Mikroperipherik.

[35] Jarvis, M. T.: Biosensors: Today's technology, tomorrow's products. SEAI Technical Publ. Okt. 1985.

[36] Tindall, B. J.; Fakoussa, R. M.: Umwelttechnologie und Biosensoren. BTF — Biotech-Forum 3 (1986) 4, S. 231—233.

[37] Claremont, D. J.; Sambrock, I. E.; Penton, C.; Pickup, J. C.: Subcutaneous implantation of ferrocene-mediated glucose sor in pigs. Diabetologia (1986) 29, S. 817—821. msr 8889

mit t als Schichtdicke. Die Funktion $k(a/w)$ kann im Bereich $0 \leqq a/w \leqq 2$ durch

$$k\left(\frac{a}{w}\right) = 0{,}5 + 0{,}14\,\frac{a}{w} \tag{2}$$

in guter Übereinstimmung mit den Meßwerten approximiert werden. Wird entsprechend Bild 1 aus vier magnetoresistiven Streifen mit unterschiedlichem Vorzeichen von α eine Brücke aufgebaut, so ergibt sich bei Anlegen eines Meßfeldes H_y für die Brückenausgangsspannung

$$U_a = U_B \cdot \frac{\Delta R}{R_0'} \cdot \cos 2\delta \cdot \frac{1}{2} \sin 2\varphi\,, \tag{3}$$

mit ΔR als maximaler Widerstandsänderung eines MR-Streifens und

$$R_0' = R_0 - \frac{\Delta R}{2} + \frac{\Delta R}{2} \sin 2\delta\,, \tag{4}$$

wobei R_0 der maximale Widerstand eines MR-Streifens ist. Der Winkel φ ist aus folgender Gleichung zu bestimmen:

$$\frac{H_x}{H_0} \tan\varphi = \frac{H_y}{H_0} - \sin\varphi\,. \tag{5}$$

H_0 ist die Feldkonstante des Sensors, die nach

$$H_0 = H_k + \frac{t}{w}\,\frac{M_S}{\mu_0} \tag{6}$$

aus der Anisotropiefeldstärke H_k der MR-Schicht und dem Formanisotropieanteil mit der Sättigungsmagnetisierung M_s berechnet werden kann. Die mittlere Abweichung der Stromrichtung von $(90° - \alpha)$ kann aus

$$\cos 2\delta = 1 - 0{,}08\,\frac{a}{w} - 0{,}11\left(\frac{a}{w}\right)^2 \tag{7}$$

für $0 \leqq a/w \leqq 2$ bestimmt werden.

Bild 2 zeigt die experimentelle Abhängigkeit der Ausgangsspannung U_a des Sensors vom Meßfeld H bei unterschiedlichen Stabilisierungsfeldern H_x. Es ergeben sich Kurven, die in der Umgebung von $H_y = 0$ linear verlaufen, wobei der Anstieg mit steigendem H_x sinkt. Bei einem Wert H_{ym} bzw. $-H_{ym}$ wird die Ausgangsspannung maximal bzw. minimal. Die Spannungsdifferenz zwischen Maximum und Minimum wird als Spannungshub des Sensors bezeichnet. Es besteht der Zusammenhang

$$\Delta U_m = U_B\,\frac{\Delta R}{R_0'} \cos 2\delta\,. \tag{8}$$

Für das Feld H_{ym} gilt

$$H_{ym} = H_x + \frac{H_0}{\sqrt{2}}\,. \tag{9}$$

Die experimentellen Kurven stimmen im Bereich $-H_{ym} \leqq H_y = H_{ym}$ sehr gut mit den berechneten überein. Bei größeren H_y treten größere Abweichungen auf, besonders für geringe Werte von H_x. Die Steilheit der Ausgangsspannungskurve ist im Arbeitsbereich bei Konstantspannungsbetrieb der Brücke

$$S_U = \frac{1}{U_B}\,\frac{dU_a}{dH_y} = \frac{\Delta R}{R_0'} \cdot \frac{\cos 2\delta}{H_0 + H_x}\,. \tag{10}$$

Berücksichtigung von (8) ergibt

$$S_U = \frac{\Delta U_m}{U_B(H_0 + H_x)}\,. \tag{11}$$

Daraus ist ersichtlich, daß die maximale Sensorempfindlichkeit im wesentlichen durch die relative Änderung des Widerstandes der MR-Schicht und durch deren Anisotropiefeldstärke und Sättigungsmagnetisierung sowie deren Breite und Dicke bestimmt ist. Die Abmessung der Leitschichtstreifen ist hier von untergeordneter Bedeutung, spielt jedoch für den Gesamtwiderstand und deshalb für die maximal anlegbare Brückenspannung eine Rolle.

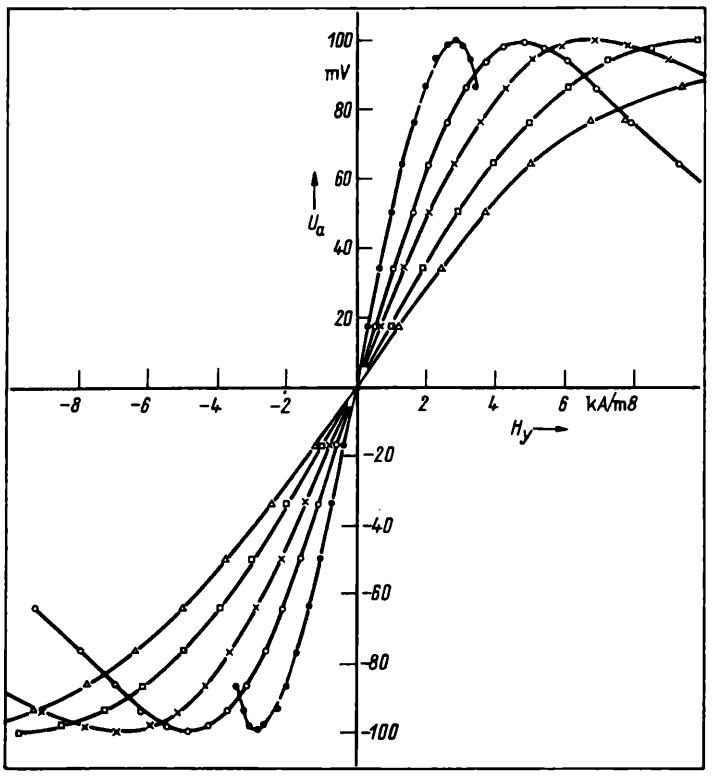


Bild 2. Sensorausgangsspannung in Abhängigkeit vom Meßfeld H_y bei unterschiedlichen Stabilisierungsfeldern H_x
● $H_x = 0$; ○ $H_x = 2$ kA/m; × $H_x = 4$ kA/m; □ $H_x = 7$ kA/m; ▽ $H_x = 10$ kA/m

Bei Konstantstrombetrieb der Brücke ($I = I_K$) ist die Ausgangsspannung durch

$$U_a = I_K\,\Delta R \cos 2\delta \cdot \frac{1}{2} \sin 2\varphi \tag{12}$$

gegeben, wobei φ wieder aus (5) zu bestimmen ist. Für die Steilheit im Arbeitsbereich gilt

$$S_I = \frac{1}{I}\,\frac{dU_a}{dH_y} = \frac{\Delta R \cos 2\delta}{H_0 + H_x}\,. \tag{13}$$

In der Umgebung von $H_y = 0$ kann die Sensorkennlinie bei Konstantspannungsbetrieb durch

$$U_{al} = \frac{\Delta U_m}{(H_0 + H_x)(1 + \varepsilon)} \cdot H_y \tag{14}$$

linear genähert werden. Dabei ist ε die zulässige relative Abweichung. Mit dieser relativen Abweichung ε kann die Näherung dann bis zu einem Bruchteil des Gesamthubes ΔU_m genutzt werden, der durch

$$U_a/\Delta U_m = \sin\{2 \arccos[D(1 + \sqrt{1 + 2H_x/(DH_0)})]\} \tag{15}$$

mit

$$D = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon}\,\frac{H_0}{2(H_0 + H_x)} \tag{16}$$

gegeben ist.

Wie aus Bild 3 zu ersehen ist, kommen bei einer zulässigen Abweichung von 1% ($\varepsilon = 0{,}01$) bei $H_x = 0$ noch 38% des Gesamthubes innerhalb der linearen Näherung nach (14) als Arbeitsbereich in Frage. Bei größeren Hilfsfeldern H_x, wie sie für einen sicheren Betrieb des Bauelementes in vielen Anwendungen erforderlich sind, sinkt dieser Bereich auf etwa 28% des Gesamthubes ab.

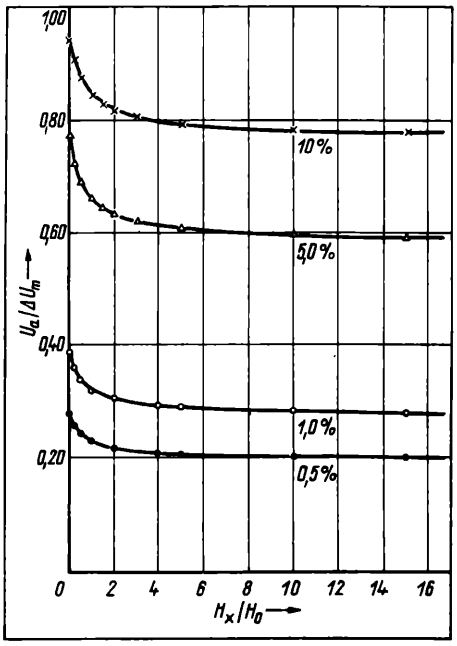


Bild 3. Grenzkurven für den Linearitätsbereich Unterhalb der jeweiligen Kurve weicht die Kennlinie maximal um den angegebenen Wert von der linearen Beziehung zwischen U_a und H_y ab

Der Gesamtwiderstand der Brücke ändert sich mit dem Feld H_y, solange die mittlere Stromflußrichtung in den MR-Streifen von 45° abweicht. Es gilt

$$R_B = R_0 - \frac{\Delta R}{2}(1 + \sin 2\delta \cdot (1 - 2\sin^2 \varphi)]\,. \tag{17}$$

Der Winkel φ ist wieder nach (5) zu bestimmen.
Für die charakteristischen Sensorparameter sind die Temperaturabhängigkeiten des MR-Schichtwiderstandes ($T_k(R_s) \approx +0{,}3\% \times K^{-1}$), der maximalen Widerstandsänderung ($T_K(\Delta R) \approx -0{,}1\% \times K^{-1}$) und der Feldkonstanten ($T_k(H_0) \approx -0{,}05\%\ K^{-1}$) von Bedeutung. Der größte Temperaturkoeffizient bei $H_x = 0$ ergibt sich für die Ausgangsspannung der MR-Sensorbrücke bei Konstanz der Betriebsspannung. Aus (10) kann man schlußfolgern:

$$T_K(U_a)_{U_B=\text{konst.}} = T_K(\Delta R) - T_K(R_S) - T_K(H_0)\,. \tag{18}$$

Bei Konstantstrombetrieb des Sensors entfällt nach (13) der Wert von $T_K(R_s)$ und es ergibt sich der wesentlich günstigere Temperaturkoeffizient

$$T_K(U_a)_{I=\text{konst.}} = T_K(\Delta R) - T_K(H_0)\,. \tag{19}$$

Bei Auftreten einer Offsetspannung am Sensor ist für diesen Fall jedoch deren Temperaturabhängigkeit zu beachten. Die Widerstandsänderung im Sensorelement beruht auf einer kohärenten Drehung der Magnetisierungsrichtung im gesamten Schichtstreifen. In deren Ablauf treten nur Verzögerungen im Nanosekundenbereich auf [4]. Damit gibt es bis zu Frequenzen von mehr als 10 MHz keine Einsatzbeschränkungen.

Tafel. Kenndaten der MR-Sensoren

Gesamtwiderstand	$R_B = (1{,}6 \pm 0{,}6)\ k\Omega$
Betriebsspannung	$U_B \leqq 12\ V$
Steilheit bei $H_x \doteq 3$ kA/m	$S_U = 3 \pm 1\ \frac{mV}{VkA/m}$
Ausgangsspannungshub, bezogen auf U_B	$\Delta U_a/U_B < 15$ mV/V
Offsetspannung, bezogen auf U_B:	$U_{off}/U_B < 10$ mV/V
Temperaturkoeffizient der Steilheit bei	
— Konstantspannungsbetrieb	$T_{k,U} < 0{,}35\%\ K^{-1}$
— Konstantstrombetrieb	$T_{k,I} < 0{,}1\%\ K^{-1}$
Linearitätsabweichung bei 28% von ΔU_a	$< 1\%$
Linearitätsabweichung bei 59% von ΔU_a	$< 5\%$
Temperatureinsatzbereich	$-40 \ldots 125$ °C
Gehäuseform	SIL 4 oder DIL 6
Hysterese bei $H_x = 2$ kA/m, bezogen auf Spannungshub	$\delta U_a/\Delta U_a < 0{,}03\%$

2. Parameter der gefertigten Sensorelemente

Bei den Entwicklungsmustern von MR-Sensoren der Friedrich-Schiller-Universität Jena wurden eine hohe lokale Auflösung und eine möglichst geringe Störfeldbeeinflussung, z. B. durch das Erdmagnetfeld, angestrebt. Gemäß der vorgestellten Funktionsweise sind dafür die Strukturgrößen der Bauelemente möglichst klein zu halten. Empfindlichere Sensoren lassen sich mit größeren Abmessungen der Funktionsschichten (sinnvoll bis in den Bereich von 100 µm) und damit des gesamten MR-Sensors erreichen.
Die magnetoresistiven Sensorelemente werden auf Siliziumsubstraten mit Hilfe fotolithografischer Methoden hergestellt. Die Chipfläche beträgt $1 \times 1\ mm^2$. Je Brückenwiderstand sind auf dem Chip neun mäanderförmig hintereinandergeschaltete Dünnschichtstreifen aus NiFe bzw. NiCoFe von etwa 30 nm Dicke (t) und 10 µm Breite (w) angeordnet. Die Leitschichtstreifen bestehen aus Aluminium und sind in einem Abstand a = 5 µm bei einer in Magnetschichtstreifenrichtung gemessenen Breite s = 3 µm angeordnet. Um Strukturen dieser Abmessungen mit genügender Reproduzierbarkeit fertigen zu können, ist der Einsatz von elektronenstrahllithografisch hergestellten Schablonen für die Fotolithografie erforderlich.
Fertigungstechnische Schwankungen in den Schichtabmessungen und -eigenschaften führen zur Ungleichheit der vier MR-Streifenwiderstände der Brücke und bewirken eine störende Offsetspannung. Durch Anbringen von Abgleichflächen, die dem magnetischen Verhalten der gesamten Sensorbrücke angepaßt sind, und Durchführung von Laserstrahlabgleich können in der Fertigung Offsetspannungen von weniger als 1 mV eingestellt werden.
Die fertigen Siliziumsubstrate werden mit üblichen Verfahren des Zyklus II der Halbleitertechnologie weiterverarbeitet und im SIL-4- oder im DIL-6-Gehäuse als Muster ausgeliefert. Ihre Kenndaten sind in der Tafel zusammengestellt. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Eigenmagnetisierung der Sensorelemente zwar durch die Streifenlängsrichtung vorgegeben, damit jedoch nicht eindeutig festgelegt ist. Ein Umklappen der Eigenmagnetisierung in die Gegenrichtung bei Einwirkung von Störmagnetfeldern kann durch Anlegen eines Magnetfeldes in Magnetstreifenrichtung (H_x) vermieden werden. Beträgt die Feldstärke mehr als 3 kA/m, ist unabhängig von der Vorgeschichte die vollständige Ausrichtung der Eigenmagnetisierung gewährleistet. Kleine Ferritmagnete in der Nähe der Sensorelemente reichen zur Erzeugung derartiger Feldstärken aus.

Zusammenfassung

Aufbau und Funktionsweise von magnetoresistiven Sensorelementen werden erläutert. Für die vom Standpunkt der Anwendung aus wichtigen Sensorparameter werden Beziehungen angegeben. Wie die Zusammenstellung der Kennwerte von Entwicklungsmustern zeigt, wird durch die magnetoresistiven Sensoren das Einsatzgebiet der Magnetfeldsensoren durch Erschließen des Bereiches von Nanotesla bis Millitesla wesentlich erweitert.

Literatur

[1] Loreit, U., Pertsch, P., Porwol, H., Gebhardt, O.: Magnetoresistive Sensoren in der Meß- und Speichertechnik. rfe, Berlin 34 (1985) 5, S. 310—319.
[2] Dibbern, U.: Magnetic field sensors using the magnetoresistive effect. Sensors and Actuators (1986) 10, S. 127—140.
[3] Tumanski, S., Stabrowski, M.: The optimization and design of magnetoresistive barber-pole sensors. Sensors and Actuators (1985) 7, S. 285—295.
[4] Pöcker, A.: Dünne magnetische Schichten und ihre Anwendung in der Speichertechnik. Der Fernmelde-Ingenieur 18 (1964), S. 1—32.

msr 8905

H. Nowak, G. Albrecht, K.-H. Berthel

Anwendung supraleitender Sensoren für biomagnetische Messungen

0. Einleitung

Im menschlichen Organismus treten sehr schwache magnetische Felder auf, deren Größe an der Nachweisgrenze herkömmlicher Magnetfelddetektoren, z. B. Fluxgate-Magnetometer, liegt. Wesentlich empfindlichere Magnetfelddetektoren sind supraleitende Quanteninterferometer, die sogenannten SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices). SQUIDs wurden Anfang der siebziger Jahre entwickelt [1] und basieren auf der Ausnutzung des Josephson-Effektes der Supraleitung. Damit steht der modernen Meßtechnik ein extrem empfindlicher Magnetfelddetektor zur Verfügung, dessen rauschbegrenzte Energieempfindlichkeit z. Z. von keinem anderen Detektor erreicht wird.

Die Messung biomagnetischer Felder ist eine Ergänzung der bekannten elektrischen Meßmethoden und eröffnet die Möglichkeit, zusätzliche Informationen über elektrisch aktive Organe, z. B. das Herz oder das Gehirn, zu erlangen, die durch elektrische Meßverfahren nicht oder nur invasiv erhalten werden können. Vorteile der Messung biomagnetischer Felder des menschlichen Organismus sind das berührungslose Messen (und damit die Vermeidung undefinierter Elektroden-Haut-Potentiale) sowie die hohe Ortsauflösung. Mit diesem neuartigen Meßverfahren wird das Spektrum diagnostischer Methoden erweitert und es werden die Möglichkeiten geschaffen, neue Informationen über den Herzmechanismus sowie über die Hirnstruktur und -organisation zu gewinnen.

Bei extrem empfindlichen Magnetfeldmessungen wirken sich im Labor die Felder des elektrischen Versorgungsnetzes, aber auch das Erdmagnetfeld störend aus. Es ist deshalb notwendig, den Störpegel soweit zu reduzieren, daß die biomagnetischen Nutzsignale noch hinreichend weit über dem Störpegel liegen, so daß die Empfindlichkeit des SQUID ausgeschöpft werden kann.

Eine weitere entscheidende Voraussetzung für die Signalanalyse und -interpretation biomagnetischer Felder ist die Signalverarbeitung mittels moderner Rechentechnik.

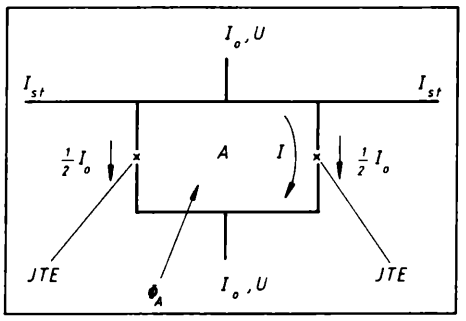


Bild 1. Schematische Darstellung eines SQUID mit zwei Josephson-Tunnel-Elementen

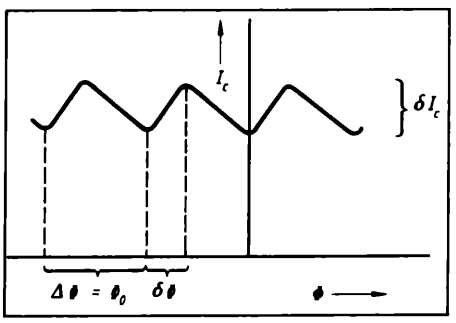


Bild 2. Abhängigkeit des kritischen Stromes I_c vom magnetischen Fluß Φ

1. Wirkprinzip, Aufbau und Charakteristik supraleitender Sensoren

SQUIDs sind supraleitende Sensoren, die den Quanteninterferenzeffekt in einem supraleitenden Ring mit einer oder zwei Josephson-Verbindungen ausnutzen. Bild 1 zeigt die schematische Darstellung eines SQUID, bestehend aus einem supraleitenden Ring und zwei Josephson-Tunnelelementen (JTE). Der Bereich der JTE hat einen sehr viel kleineren kritischen Strom als der übrige supraleitende Ring. Durch das SQUID fließt ein Strom I_0. Haben beide JTE die gleichen Parameter, so fließt über jedes JTE der Teilstrom $I_0/2$. Eine Änderung des magnetischen Flusses Φ_A senkrecht zur SQUID-Fläche A ruft sowohl einen zusätzlichen Abschirmstrom I im SQUID-Ring als auch ein quantenhaftes Eindringen von magnetischen Flußquanten $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ Vs in den Ring hervor. Daraus resultiert eine periodische Abhängigkeit des kritischen Stromes $I_c(\Phi_A)$

$$I_c(\Phi_A) = \text{konst.} \cdot \cos(\pi \Phi_A / \Phi_0) . \quad (1)$$

Die Magnetfeldempfindlichkeit eines SQUID ist durch die Änderung des kritischen Stromes I_c innerhalb einer Feldperiode bestimmt. Dieser Zusammenhang wird im Bild 2 dargestellt. Aus dem sehr kleinen Wert von Φ_0 sowie aus der hohen Auflösung innerhalb einer Periode, nämlich 10^{-5} bis $10^{-6}\Phi_0$, ergibt sich die extreme Empfindlichkeit dieser Meßanordnung bei Änderungen des einwirkenden magnetischen Flusses Φ_A oder der damit zusammenhängenden Flußdichte

$$B = \frac{\Phi_A}{A} . \quad (2)$$

Die Magnetfeldempfindlichkeit des SQUID allein ist jedoch für viele Anwendungen, wie auch im Falle biomagnetischer Messungen, nicht ausreichend. Durch die Vergrößerung der Empfängerschleife oder eines supraleitenden Gradiometers und deren Ankopplung an das SQUID kann die Magnetfeldempfindlichkeit bedeutend erhöht werden.

Ebene Dünnschicht-SQUIDs mit zwei JTE wurden an der Sektion Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena entwickelt und herge-

---

Dr. rer. nat. HANNES NOWAK (39) studierte von 1968 bis 1973 Physik an der Boleslaw-Bierut-Universität Wroclaw/VR Polen. Danach wissenschaftlicher Mitarbeiter und Aspirant an der Sektion Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Promotion A auf dem Gebiet Biomagnetismus. Seit 1981 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Physikalisch-Technischen Institut Jena der AdW der DDR.

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. rer. nat. h. c. GÜNTER ALBRECHT (58) studierte von 1951 bis 1957 Physik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. 1962 Promotion A über spezielle Molekülstrukturen und 1967 Promotion B über elektronische Wechselwirkungen in Übergangsmetallhydriden. Bis 1978 Hochschullehrer an der FSU Jena, Sektion Physik. Seitdem Leiter des Forschungsbereiches Physik der AdW der DDR. 1978 Akademiemitglied; Ehrendoktor der TU Karl-Marx-Stadt.

Prof. Dr. sc. nat. KARL-HEINZ BERTHEL (53) studierte von 1952 bis 1957 Physik an der TH Dresden. Von 1958 bis 1968 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Reinststoffe Dresden. 1965 Promotion A über die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Wolfram und Molybdän. Von 1968 bis 1978 wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZFW Dresden der AdW der DDR. Von 1970 bis 1971 Mitarbeiter am Institut für Physikalische Probleme der AdW der UdSSR in Moskau sowie 1973 bis 1976 stellvertretender Direktor des Internationalen Laboratoriums für Hohe Magnetfelder und Tiefe Temperaturen in Wroclaw/VR Polen. 1976 Promotion B über elektrische und supraleitende Eigenschaften von höchstreinem Niob. 1978 Berufung an die Friedrich-Schiller-Universität Jena, Hochschullehrer an der Sektion Physik, Leiter des Wissenschaftsbereiches Detektorenphysik.

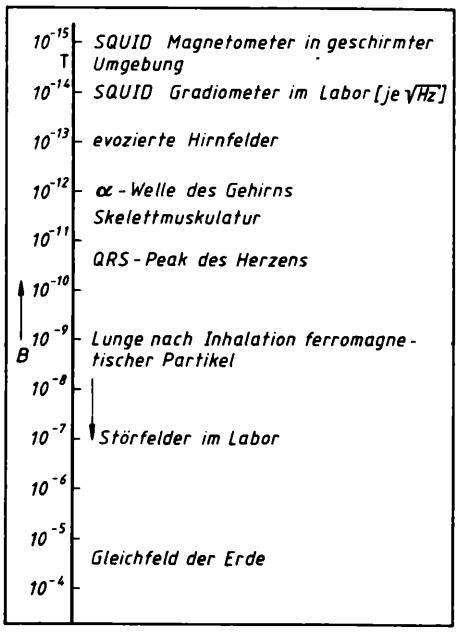


Bild 3. Übersicht über biomagnetische Felder und magnetische Störfelder

stellt. Dabei kommt eine hochentwickelte Dünnschichttechnologie mit ähnlichen Anforderungen wie in der Mikroelektronik zum Einsatz. Das SQUID ist mit allen Kontaktflächen auf einem Siliziumsubstrat der Größe 3×5 mm² angeordnet. Zur Ankopplung des Gradiometers und der Vermeidung einer Fehlanpassung Antenne — SQUID wurde (international erstmals) in Jena eine monolitisch mit dem SQUID verbundene Einkoppelspirale in Dünnschichttechnik realisiert [2]. Diese Idee wurde zur Grundlage für alle heute im internationalen Maßstab hergestellten Dünnschicht-SQUIDs. Die Einkoppelspirale der Jenaer Struktur besteht aus zweimal 18 Windungen in Gradiometerkonfiguration mit einer Eingangsinduktivität von etwa 1 µH und einem Kopplungsfaktor von etwa 0,8 zum SQUID. Sie wird mit Hilfe des Fotoätzverfahrens hergestellt. Die anderen Schichten werden im Lift-off-Verfahren strukturiert. Die SQUID-Schleifen bestehen aus Pb oder Pb-Legierungen. Als Isolation wird durchgängig SiO verwendet [3]. Die Josephson-Tunnel-Elemente werden aus einem Dünnschichtsystem Nb—NbO_x—Pb mit einer Fläche von $2{,}6 \times 2{,}6$ µm² gebildet. Das weiße Flußrauschen dieser dc-SQUID ist besser als $7 \cdot 10^{-6} \Phi_0$ $Hz^{-1/2}$. Das entspricht einem äquivalenten Stromrauschen an der Eingangsspule von 3,8 pA $\times Hz^{-1/2}$ und einer Energieempfindlichkeit von $1{,}2 \cdot 10^{-30}$ Ws² [4]. Diese SQUID-Parameter verkörpern internationale Spitzenwerte für in der Meßtechnik einsetzbare SQUIDs.

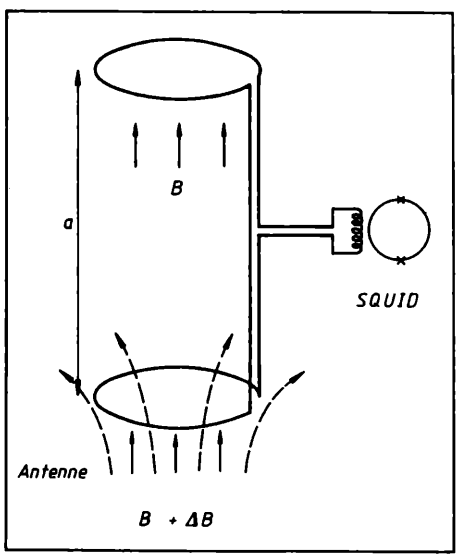


Bild 4. Schematische Darstellung eines Gradiometers 1. Ordnung

2. Magnetische Felder

2.1. Größenordnung biomagnetischer Felder

Im menschlichen Organismus laufen zahlreiche Energieumwandlungen ab, die mit elektrischen und damit verknüpften magnetischen Zustandsänderungen einhergehen. Diese biomagnetischen Felder sind verhältnismäßig schwach. Eine Übersicht wird im Bild 3 gegeben. Die registrierte magnetische Herzaktivität wird in Anlehnung an das Elektrokardiogramm (EKG) als Magnetokardiogramm (MKG) bezeichnet, dessen maximale Amplitude der magnetischen Flußdichte bei einigen 10^{-11} T liegt. Die magnetische Aktivität der Skelettmuskulatur (Magnetomyogramm — MMG) beträgt etwa 10^{-11} T, die spontane Magnetfeldaktivität des Gehirns (Magnetoencephalogramm — MEG) und evozierte Hirnmagnetfelder können Werte bis zu 10^{-13} T erreichen.

2.2. Magnetische Störfelder

Die Größenordnung der Streufelder von stromdurchflossenen Kabeln, Installationsrohren oder von tragenden Elementen eines Bauwerkes liegt im Labor ohne leistungsstarke Anlagen zwischen 10^{-7} und 10^{-8} T, d. h., etwa 1000mal stärker als die Maximalamplitude im Magnetokardiogramm. Das Gleichfeld der Erde ist sogar 1000000mal stärker und hat Werte von einigen 10^{-5} T (s. auch Bild 3).

Bei extrem empfindlichen Magnetfeldmessungen wirken sich die Störfelder des elektrischen Versorgungsnetzes, der Erdmagnetfeldschwankungen wie auch bei mechanischen Unruhen das Gleichfeld der Erde störend aus. Es ist deshalb notwendig, den Störpegel soweit zu reduzieren, daß die Nutzsignale noch hinreichend weit über dem Störpegel liegen, so daß das Auflösungsvermögen der SQUIDs ausgeschöpft werden kann.

Eine Möglichkeit der Störfeldunterdrückung sind magnetische Großraumabschirmungen [5] und [6] aus mehreren Schichten hochpermeabler Materialien (Mu-Metall), Weicheisen sowie aus Kupfer oder Aluminium. Eine andere Möglichkeit zur Reduzierung des Störpegels sind geeignete Antennensysteme, sogenannte Gradiometer.

2.3. Gradiometer

Das Gradiometerprinzip besteht darin, daß zwei gegensinnig gewickelte supraleitende Spulen mit dem Abstand a so zu bemessen sind (Bild 4), daß der resultierende Induktionsstrom eines homogenen Feldes B im Gesamtkreis Null wird. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, daß die Quellen der Störfelder relativ weit von dem Gradiometer entfernt sind und somit ein quasi homogenes Störfeld am Meßort liefern. Die dipolartigen, biomagnetischen Quellen dagegen sind nahe und ihre Felder demzufolge stark inhomogen. Solche Felder rufen im Gradiometer (1. Ordnung) einen Abschirmsuprastrom I hervor, der durch das SQUID nachgewiesen werden kann.

Zur Unterdrückung homogener Störfelder und homogener Störfeldgradienten werden Gradiometer 2. Ordnung verwendet. Sie bestehen aus zwei gegenseitig hintereinander geschalteten Gradiometern 1. Ordnung. Wird nun die Flußänderung Φ_A nach (2) unter der Voraussetzung, daß der magnetische Fluß jede Gradiometerspule durchsetzt (d. h. das quasihomogene Feld B), in eine Taylorreihe entwickelt, können die Gradiometerbedingungen (3) zur Unterdrückung homogener Felder

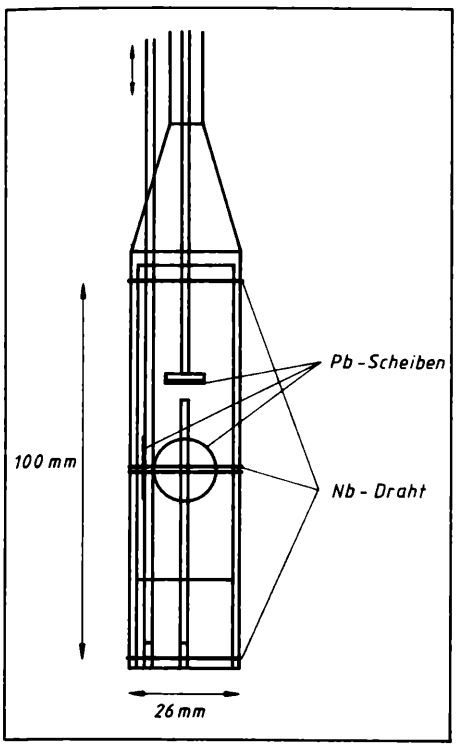
$$N_1 A_1 + N_3 A_3 = N_2 A_2 \tag{3}$$

und (4) zur Unterdrückung homogener Feldgradienten erhalten werden

$$a N_1 A_1 = b N_2 A_2 \,, \tag{4}$$

wobei N_i die Anzahl der Windungen ($i = 1, 2, 3$), A_i die Flächen der Spulen, a der Abstand zwischen 1. und 3. Spule und b der Abstand zwischen 2. und 3. Spule ist.

Die baubedingte Genauigkeit von Gradiometersystemen ist begrenzt. Die Spulenflächen sind nicht exakt gleich, sie liegen nicht genau parallel, so daß erfahrungsgemäß der baubedingte Abgleich eines Gradiometers 2. Ordnung bei 10^{-2} liegt, d. h., ein homogenes Störfeld wird nur um den Faktor 100 unterdrückt. Aus dem Vergleich



◄ **Bild 5. Gradiometer 2. Ordnung mit Abgleichvorrichtung, bestehend aus 3 orthogonal zueinander liegenden, beweglichen supraleitenden Scheiben**

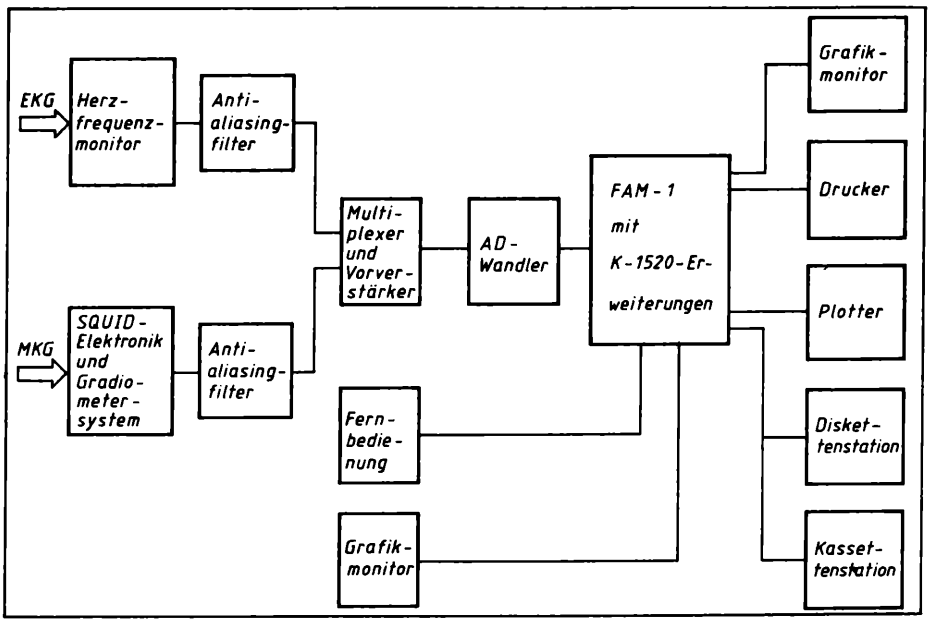


Bild 7. Schematische Darstellung der Signalverarbeitung

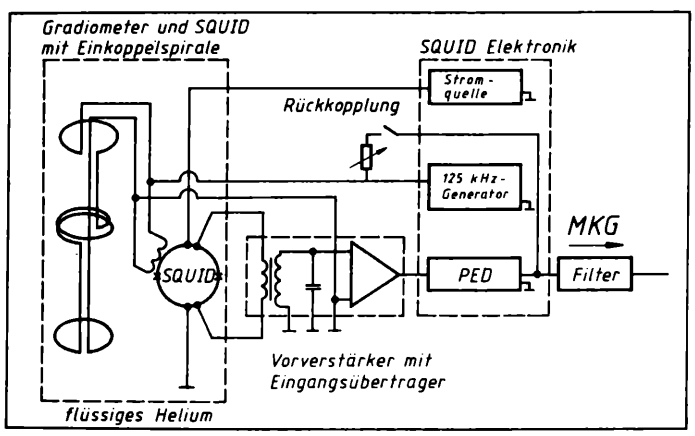


Bild 6. Blockschaltbild MKG-Meßsystem

biomagnetischer Felder — Störfelder (Bild 3) ist ersichtlich, daß dieser Unterdrückungsgrad noch nicht ausreicht. Deshalb muß solch ein Gradiometer zusätzlich abgeglichen werden, damit die Gradiometerbedingungen exakter erfüllt werden. Mittels verstellbarer supraleitender Scheiben kann über die Flußverdrängung die effektive Fläche der einzelnen Gradiometerspulen korrigiert und somit ein homogenes Störfeld besser unterdrückt werden. Wie im Bild 5 gezeigt wird, werden dazu 3 orthogonal zueinander stehende Scheiben verstellbar angeordnet. Nach Untersuchungen von HABERKORN [7] kann die erforderliche Scheibengröße und Scheibenlage berechnet werden. Die experimentelle Realisierung dieser Abgleichprozedur ist zeitaufwendig. Mit dem Meßsystem im biomagnetischen Labor in Jena, das als Antennensystem ein symmetrisches Gradiometer 2. Ordnung (Durchmesser 26 mm, Gesamtlänge 100 mm) verwendet, wurde ein Abgleich von etwa 10^{-5} erreicht, d. h., ein homogenes Magnetfeld wird um den Faktor 100000 unterdrückt.

3. Meßverfahren — Signalverarbeitung

Voraussetzung für die Funktion des SQUID und des damit gekoppelten Gradiometers sind supraleitende Effekte, d. h., diese Elemente müssen bei Temperaturen unterhalb der kritischen Temperatur betrieben werden. Für den hier vorliegenden Anwendungszweck wird flüssiges Helium (Temperatur 4,2 K = —269,0 °C) als Kühlmittel eingesetzt. Das Meßsystem befindet sich deshalb in speziellen, nichtmagnetischen superisolierten Kunststoffkryostaten, die mit flüssigem Helium gefüllt sind.

Die schematische Darstellung eines MKG-Meßsystems wird im Bild 6 gezeigt. Eine magnetische Flußänderung im Gradiometer bewirkt im SQUID eine Spannung, die sich am Ausgang mit einer Periode von Φ_0 wiederholt. Die SQUID-Elektronik linearisiert das nichtlineare Übertragungsverhalten mittels eines negativen Rückkoppelstromes, um zu einer Flußhalteschleife zu gelangen. In dieser Arbeitsweise wirkt das SQUID als Nulldetektor. Zusätzlich zum DC-Basisstrom wird ein schwaches AC-moduliertes Feld ($\leqq\Phi_0/2$) durch induktive Kopplung an das SQUID angelegt. Die resultierende AC-Spannung wird verstärkt und über einen phasenempfindlichen Gleichrichter verschiedenen Filtern zugeführt.

Bei Messungen am Herzen wird parallel zum so registrierten MKG das EKG mittels Extremitätenableitungen aufgezeichnet. Es dient sowohl als Vergleichssignal als auch zur Triggergewinnung. Das Schema der Signalverarbeitung ist im Bild 7 detailliert dargestellt. Für besonders empfindliche Magnetfeldmessungen, z. B. hochaufgelöstes MKG oder die magnetische Antwortreaktion des Gehirns auf evozierte Signale (akustische, visuelle oder somatosensorische Stimuli), wird die Averaging-Technik zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses angewendet. Dies erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird aus einigen Perioden, z. B. 4, ein Standard gebildet. Dieses Standard-Signal ist die Basis für den zweiten Schritt. Eine Toleranzgrenze wird um dieses Signal gelegt, z. B. 20%, und für den eigentlichen Averaging-Zyklus werden nur die Signale zugelassen, die innerhalb dieser Toleranzgrenze liegen. Damit entfallen automatisch alle Artefakte. Diese Mittelwertbildung ist eine On-line-Prozedur. Deshalb stehen die Ergebnisse zur sofortigen Wertung zur Verfügung.

4. Messungen biomagnetischer Felder

Mit dem oben beschriebenen Meßsystem wurde vom Physikalisch-Technischen Institut (PTI) Jena (AdW) und der FSU Jena (Sektion Physik) ein biomagnetisches Labor aufgebaut (Bild 8). Das Gradiometer befindet sich in dem abgebildeten Fingerkryostat etwa 15 mm von der Körperoberfläche entfernt. In unmittelbarer Nähe des Antennensystems wirken sich ferromagnetische Materialien störend aus.

Deshalb bestehen die Kryostatenhalterung und die Personenliege nur aus Holz und Kunststoff. Mit dieser Anlage wurde eine rauschbegrenzte Empfindlichkeit von 20 fT $Hz^{-1/2}$ (1 fT = 10^{-15} T) bei

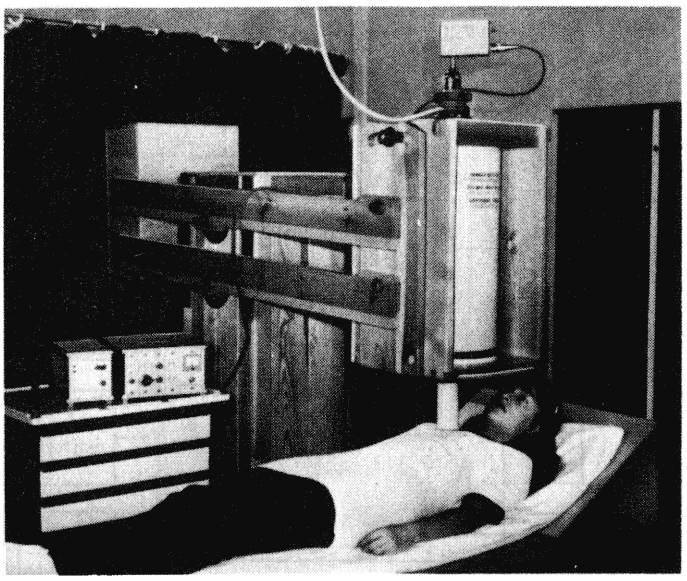


Bild 8. Biomagnetisches Labor Jena

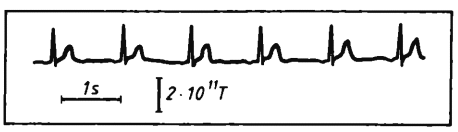


Bild 9. Magnetokardiogramm

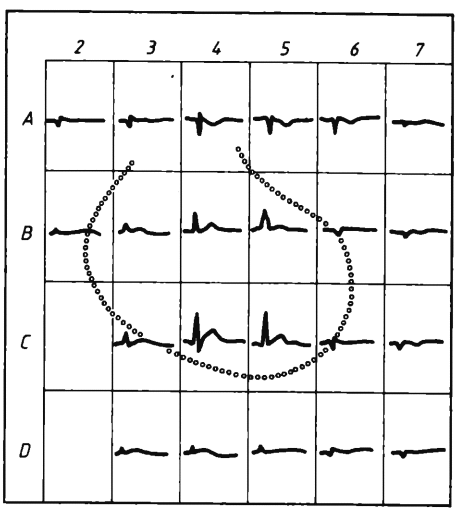


Bild 10. MKG-Karte über dem Brustkorb (Versuchsperson: H. N.)

einer Brandbreite von 150 Hz erreicht. Bei Testmessungen in der magnetisch geschirmten Kammer in Helsinki [5] mit einem nichtabstimmbaren Gradiometer 1. Ordnung und einem SQUID aus Jena wurde sogar eine rauschbegrenzte Empfindlichkeit von 5 fT $Hz^{-1/2}$ erreicht. Dies entspricht dem internationalen Spitzenwert.

Das Herz ist das elektrisch aktivste Organ des menschlichen Organismus. Im Bild 9 wird ein typisches Magnetokardiogramm gezeigt. Ein Vorteil des Magnetfeldmeßverfahrens ist die relativ hohe Ortsauflösung. Wird beispielsweise die Brustkorboberfläche in ein Gitter mit etwa 3,5 cm Kantenlänge eingeteilt (wie im Bild 10 der Fall), erhält man nach der Magnetfeldmessung über diesem Gitter die Magnetfeldverteilung über dem Brustkorb. Die Lage des Herzens wird durch die Punkt-Linie angedeutet. Eine deutliche Ortsabhängigkeit des Herzmagnetfeldes ist zu erkennen. Legt man solch eine Karte zugrunde, können mit Hilfe der Signalverarbeitung verschiedene Darstellungsformen der Gesamtherzaktivität gewählt werden, z. B. isomagnetische Linien, 3-D-Darstellungen oder Dipol- bzw. Multipollokalisation. Für den Zeitpunkt 16 ms vor der Hauptaktivität des Herzmuskels, dem R-Peak, wird im Bild 11 die Darstellung der isomagnetischen Linien gezeigt. Das Maximum liegt im Bereich D 4 und das Minimum bei A 4. Die Nullinie zeigt annähernd die Projektion des äquivalenten Herzstromdipols. Die Felddifferenzen zwischen zwei Linien betragen 2 pT. Für den gleichen Zeitpunkt wird im Bild 12 eine 3-D-Darstellung gezeigt.

In der Kardiografie spielt der Nachweis von Mikrofeldern, z. B. HIS-Aktivität oder Spätfelder, eine wichtige Rolle. Dabei kommt dem Nachweis der Spätfelder (Nachschwankungen der QRS-Hauptaktivität) eine besondere Bedeutung zu, weil das Auftreten dieser Spätfelder mit dem plötzlichen Herztod korreliert. Die Mikrofelder sind etwa 100mal schwächer als die magnetische Hauptaktivität des Herzens. Deshalb werden z. B. 64 Herzperioden unter Verwendung des R-Peaks aus dem simultan registrierten EKG als Trigger gemittelt. Somit können bei entsprechend empfindlichen Meßanordnungen sogenannte hochaufgelöste MKGs registriert werden. Untersuchungen zu Spätfeldern an Patienten mit ventrikulären Tachykardien ergaben eine signifikante Korrelation ($p < 0{,}05$, χ-Test) zwischen dem Auftreten von elektrokardiografisch registrierten Spätpotentialen und magnetokardiografisch registrierten Spätfeldern. Eine Häufung des Auftretens von Spätfeldern konnte in der Umgebung der Position D 5 gefunden werden [8].

Bild 13 zeigt ein hochaufgelöstes MKG der HIS-Aktivität (PQ-Intervall) für 3 Positionen sowie ein intrakardial gemessenes EKG (Strichlinie). Die magnetische HIS-Aktivität ist an den Meßkurven C 5 und D 3 deutlich zu erkennen, wobei der Zeitpunkt mit dem aus dem intrakardial gewonnenen HIS-EKG übereinstimmt. Durch solche hochaufgelösten MKG-Messungen ist die Lokalisation z. B. der Vorerregung beim WPW-Syndrom nichtinvasiv und berührungslos möglich, was durch eigene Messungen untermauert werden konnte.

Die magnetische Meßmethode ist vor allem hinsichtlich der Lokalisation von Feldquellen bei Hirnmagnetfeldmessungen a-priori der elektrischen Meßmethode überlegen, weil die Schädeldecke und die

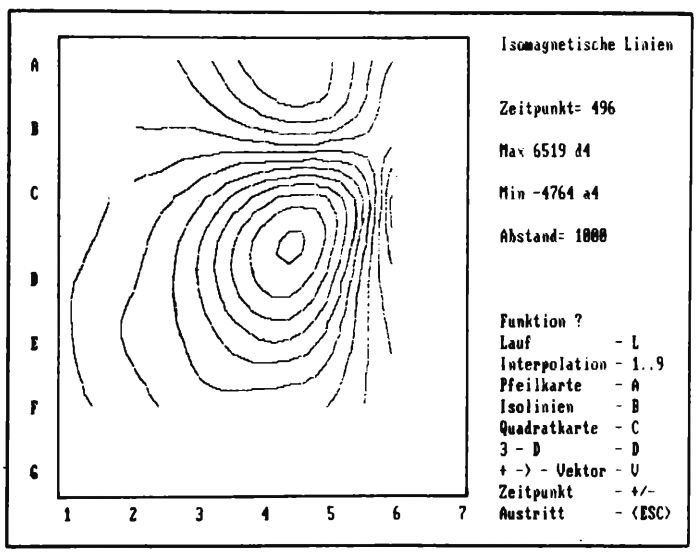
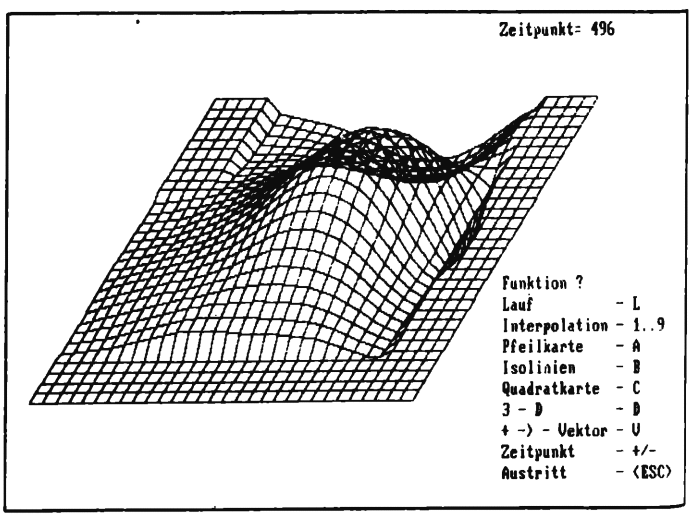


Bild 11. Isomagnetische Linien einer MKG-Karte

Bild 12. 3-D-Darstellung der Herzaktivität



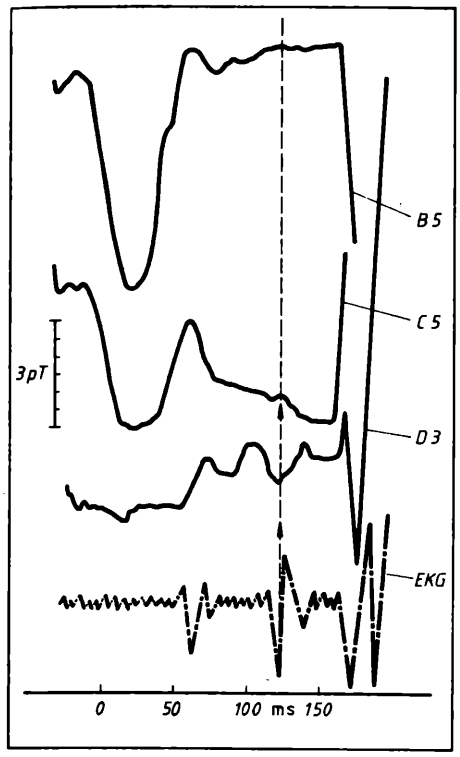


Bild 13. Hochaufgelöstes MKG, HIS-Aktivität

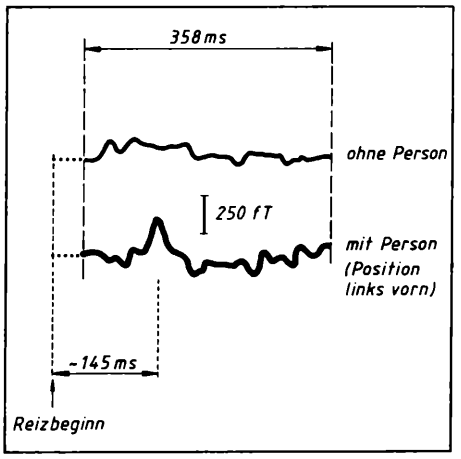


Bild 14. Akustisch evoziertes Hirnmagnetfeld Tonburst 0,5 s lang, alle 2 s; kontralaterale Reizung; Zahl der Mittelungen: 256

Kopfhaut das magnetische Signal nicht verfälschen. Die magnetische Antwortfunktion des Gehirns auf ein akustisch evoziertes Signal wird im Bild 14 gezeigt. Die Versuchsperson wurde durch einen Tonburst alle 2 s über eine Dauer von 500 ms akustisch stimuliert. Die untere Kurve stellt die magnetische Antwort des Gehirns dar, wobei über 256 Zyklen gemittelt wurde. In Übereinstimmung mit anderen Arbeiten wurde ein signifikantes Signal 145 ms nach Einsetzen des Stimulus erhalten. Die obere Kurve wurde als Vergleichsfunktion aufgenommen, d. h. unter den gleichen Bedingungen, aber ohne Versuchsperson.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung supraleitender Sensoren bei biomagnetischen Messungen kann zur Erweiterung diagnostischer Methoden in der Medizin dienen. So können beispielsweise Informationen über die Herzaktivität gewonnen werden, die durch Oberflächenelektroden nicht oder nur sehr schwer erfaßbar sind bzw. nur durch invasive Meßverfahren (Katheter) zu erhalten sind. Der Vorteil des magnetischen Meßverfahrens kommt nicht nur in der berührungslosen Messung und der damit verbundenen Möglichkeit, Gleichfelder zu registrieren, zum Ausdruck, sondern auch in der hohen Ortsauflösung und Quellenlokalisation. Eine Verkürzung der Meßzeit sowie ein höherer Informationsgehalt wird beim Übergang von einkanaligen zu mehrkanaligen Meßsystemen erreicht. An der Entwicklung solcher Meßsysteme wird gearbeitet. Die biomagnetische Meßtechnik, Signalauswertung sowie diagnostische Methoden können dadurch wesentlich verbessert werden. Eine zunehmende Anwendung und Bedeutung dieses Meßverfahrens in der medizinischen Forschung (Kardiologie, Neurologie, Physiologie) ist entsprechend den internationalen Tendenzen auch in der DDR zu erwarten.

Literatur

[1] Zimmerman, J. E.; Frederick, N. V.: Miniature ultrasensitive superconducting magnetic gradiometer and its use in cardiography and other applications. Appl. Phys. Lett. 19 (1971), S. 16—19.

[2] Dettmann, F.; Richter, W.; Albrecht, G.; Zahn, W.: A monolithic thin film dc-SQUID. Phys. stat. sol (a) 51 (1979), S. 185—187.

[3] Dettmann, F.; Blüthner, K.: Vielfach-Dünnschicht-SQUID mit Einkoppelspule. Tagungsband, 16. Internationales Symposium Tieftemperaturphysik und Kryoelektronik, Bad Blankenburg (3. bis 7. Dezember 1984), S. 43—47.

[4] Berthel, K.-H.; Albrecht, G.; Kirsch, G.; Nowak, H.; Vodel, W.; Zach, H.-G.: Application of dc-SQUIDs for biomagnetic measurements. Proceedings, 4. Tschechoslowakisches Symposium schwacher Supraleitung, Smolenice (7. bis 11. April 1986), S. 53—63.

[5] Kelhae, V. O.: Construction and performance of the Otaniemi magnetically shielded room. Biomagnetism, Berlin/New York: Walter de Gruyter 1981, S. 33—50.

[6] Mager, A.: Berlin magnetically shielded room (BMSR). In [5], S. 51—78.

[7] Haberkorn, W.; Albrecht, G.; Nowak, H.; Zach, H.-G.; Kirsch, G.: Feinabstimmung supraleitender Gradiometer. Feingerätetechnik, Berlin 31 (1982) 12, S. 547—548.

[8] Heinke, M.; Albrecht, G.; Berthel, K.-H.; Burghoff, M.; Nowak, H.; Volkmann, H.: Vergleich magnetokardiographischer und elektrokardiographischer Erfassung sogenannter ventrikulärer Spätpotentiale mittels Signalmittelung bei Patienten mit ventrikulären Tachykardien. 5. Bad Liebensteiner Elektrokardiologisches Symposium, Bad Liebenstein (13. bis 15. Januar 1988), Vortrag. msr 8885

In eigener Sache

Interessenten wenden sich bitte an:

VEB Verlag Technik
Oranienburger Str. 13/14
Berlin
1020

Redaktion „messen · steuern · regeln"
Tel.: 2 87 03 62
2 87 03 74

Wir suchen einen Fachredakteur für unsere Zeitschrift, der in oder bei Berlin über Wohnraum verfügt. Er sollte ein abgeschlossenes Hochschulstudium in der Fachrichtung Technische Kybernetik/Automatisierungstechnik oder in einem angrenzenden Gebiet (z. B. Technische Informatik oder Elektrotechnik/Elektronik) und gute Kenntnisse der deutschen Sprache haben.

Seine Aufgaben umfassen:
— redaktionelle und fachliche Bearbeitung von Manuskripten
— Besuch und Auswertung von Fachtagungen, -messen und -ausstellungen
— fachbezogene journalistische Tätigkeit.

H. Ullmann

Festelektrolytsensoren

0. Einleitung

Unter den chemischen Sensoren haben solche zur Kontrolle von gasförmigen Verunreinigungen oder Reaktionsprodukten große Bedeutung für viele Anwendungsgebiete, wie Prozeßmeßtechnik, Metallurgie, Energetik, Umweltschutz und andere.
Für die On-line- oder In-situ-Meßtechnik werden Sensoren gebraucht, die unter den Prozeßbedingungen unmittelbar im Meßmedium betriebsfähig sind. Festelektrolytsensoren arbeiten bei hohen Temperaturen auch in chemisch aggressiven Gasen oder Metallschmelzen. Sie stellen Sensortypen dar, die für moderne Technologien mit hohen Reinheits- oder Qualitätsanforderungen inzwischen zum unverzichtbaren Kontrollinstrument geworden sind. Jährlich werden viele Millionen Stück solcher Sensoren in der Welt verwendet. Auch in der DDR werden Festelektrolytsensoren entwickelt, produziert und eingesetzt.

1. Funktionsprinzipien von Festelektrolytsensoren

Festelektrolytsensoren nutzen die Eigenschaft bestimmter Ionenkristalle, bei erhöhter Temperatur den elektrischen Strom in Form von Ionen zu transportieren [1]. Festelektrolyt(FE)-Sensoren werden in zwei Grundanordnungen aufgebaut:

1. Stromlose Messung des elektrischen Potentials zwischen einer Referenz- und einer Meßelektrode in Form der FE-Potentiometrie (open circuit application; Bild 1)
2. Messung des Ionenstromes einer bestimmten Ionenart durch den Festelektrolyten bei Anlegen einer äußeren Spannung an die Elektroden (closed circuit application) in Form verschiedener amperometrischer Verfahren (Bild 2).

Zwischen diesen Grundanordnungen gibt es eine Reihe von Kombinationen.
Die prinzipiellen Grenzen und gleichzeitig Fehlerquellen sind gegeben durch

— mögliche Elektronenhalbleitung im FE-Material
— die Kinetik des Elektrodenprozesses
— die Konstanz des Referenzpotentials
— die *U-I*-Charakteristik der Anordnung.

1.1. Potentiometrische Festelektrolytmeßverfahren

Potentiometrische FE-Zellen (Bild 1) arbeiten nach der Nernstschen Gleichung: Bei konstanter Temperatur und bekanntem Potential an der Referenzelektrode ist die Zellspannung linear abhängig vom Logarithmus der Aktivität bzw. des Partialdrucks der zu messenden Komponente. Eine weitere Bedingung, die in der überwiegenden Zahl der Anwendungsfälle eingehalten wird, ist $t_{ion} = 1$, d. h., der Festelektrolyt ist ein reiner Ionenleiter. Aufgrund des halblogarithmischen Zusammenhangs zwischen Meßgröße und Meßwert sind FE-potentiometrische Verfahren geeignet, einen breiten Meßbereich zu überstreichen. Die schnelle Anzeige (in Sekunden) und der weite Bereich der Arbeitstemperatur (einige 100 bis 1800 °C, je nach FE-Material) prädestinieren die FE-Potentiometrie für die In-situ-Prozeßmeßtechnik. Die absolute Größe der Zellspannung U ist abhängig von der Differenz zwischen Meß- und Referenzpotential. Da mögliche Fehler mit steigender Differenz dieser beiden Potentiale wachsen, sollten Meß- und Referenzgasdruck nicht zu weit auseinander liegen. Die

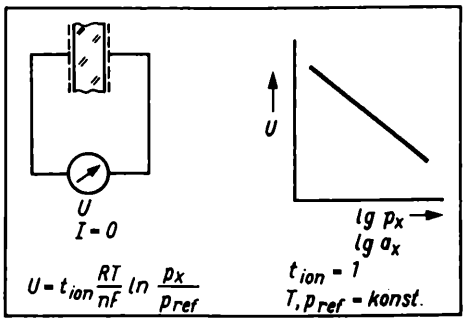


Bild 1. Potentiometrischer Festelektrolytsensor
U Zellspannung; I Strom; $p_{ref.}$ Referenzdruck; p_x, a_x Partialdruck bzw. Aktivität der zu messenden Komponente x; t_{ion} mittlere ionische Überführungszahl

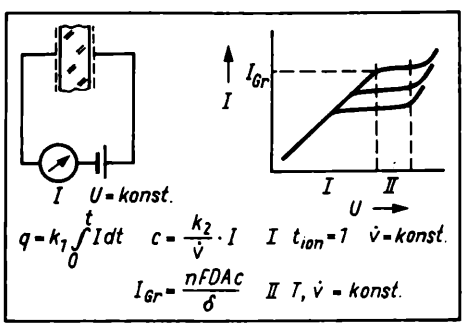


Bild 2. Amperometrischer Festelektrolytsensor
U angelegte Spannung; I Strom; I_{Gr} Grenzstrom; t_{ion} mittlere ionische Überführung; q Strommenge; c Konzentration; $\dot{v}$ Durchfluß des Meßmediums; D Diffusionskoeffizient; δ Diffusionsschichtdicke; A Diffusionsfläche

Zellspannungswerte liegen zwischen 0 und 2 V. Die prinzipielle obere Grenze ist durch die Zersetzungsspannung des Festelektrolytmaterials gegeben. Der Widerstand der FE-Zelle ist temperaturabhängig, er kann in ungünstigen Fällen bei 10^4 ... 10^5 Ω liegen. Für die exakte Potentialmessung sind Meßanordnungen mit entsprechend hohem Eingangswiderstand zu verwenden.

1.2. Amperometrische Festelektrolytmeßverfahren

Mit Hilfe einer an die Elektroden angelegten Spannung läßt sich ein elektrischer Strom im Stromkreis erzeugen, der durch den Festelektrolyten in Form der bevorzugt transportierten Ionenart X fließt (Bild 2). Wenn der Festelektrolyt ein reiner Ionenleiter ist ($t_{ion} = 1$), gelten die Faradayschen Gesetze. Das erste Faradaysche Gesetz wird in Form coulometrischer Meßverfahren genutzt:
Die Masse des elektrochemisch umgesetzten Stoffes ist proportional der geflossenen Strommenge.
Im Bereich der Gültigkeit der Faradayschen Gesetze (Bereich I in Bild 2) bilden I und U einen linearen Zusammenhang, den man in Form amperometrischer Stoffumsetzungen für präparative und analytische Zwecke nutzen kann. Bei weiterer Erhöhung der Spannung (Bereich II) wird der Strom durch die Andiffusion der Komponente X an die Kathode begrenzt. Der Diffusionsgrenzstrom ist bei konstanten Temperatur- und Diffusionsbedingungen ein Maß für die Konzentration der Komponente X. Dieses Verfahren bezeichnet man als FE-Polarographie. Bei den amperometrischen Verfahren fließen Ströme von max. 1 mA/cm² durch den Festelektrolyten. Die angelegte Spannung ist der umzusetzenden Komponente und ihrem Konzentrationsbereich anzupassen, sollte aber nicht mehr als 2 V betragen.
FE-Potentiometrie, Amperometrie und Coulometrie sind direkte chemische Meßverfahren, d. h., sie beruhen auf der unmittelbaren Umsetzung der zu messenden chemischen Komponente. Diese Meßverfahren arbeiten nach elektrochemischen Gesetzmäßigkeiten, ohne Kalibrierung. Nur die Polarographie benötigt eine Kalibrierung, weil bei ihr auch geometrische Faktoren in die Auswertegleichung eingehen.

Prof. Dr. sc. nat. HELMUT ULLMANN (52) studierte bis 1963 in der Fachrichtung Kerntechnik/Radiochemie an der Technischen Universität Dresden. 1967 Promotion A. 1977 Promotion B an der AdW der DDR über Festelektrolyt-Meßtechnik. Jetzt Abteilungsleiter am Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf und Professor für Reaktorchemie.

Tafel. In Festelektrolytsensoren verwendete Ionenleiter

Ionenleiter	transportierte Ionenart	analysierte Komponente	Literatur
stabilisiertes Zirconiumdioxid[1])	O^{2-}	O_2 (indirekt H_2, CO, KW, H_2O)	[2]
dotiertes Thoriumdioxid[1])	O^{2-}	O_2	[2]
dotiertes $SrCeO_3$	H^+	H_2, H_2O	[5]
Poly-Antimonsäure $Sb_2O_5\ nH_2O$	H^+	H_2	[6]
$PbSnF_4$	F^-	F_2, O_2, H_2, NH_3	[7]
$K_2CO_3(+SrCO_3)$	K^+	CO_2	[8]
$K_2SO_4(+BaSO_4)$	K^+	SO_x	[8]

[1]) Hersteller in der DDR: Betrieb *Wärmekeramik Dürrröhrsdorf* des Kombinates *Keramische Werke Hermsdorf*

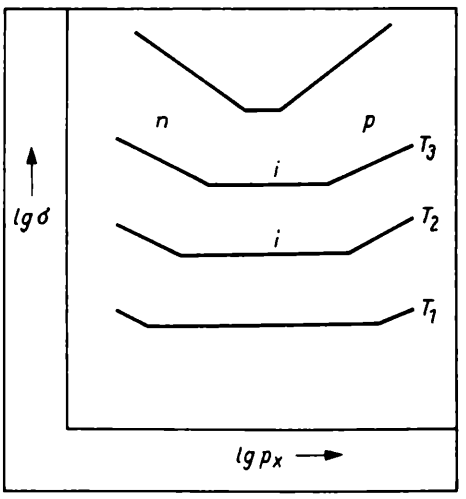


Bild 3. Spezifische elektrische Leitfähigkeit σ, Ionenleitfähigkeit σ_i und p- und n-Halbleitung in Ionenkristallen in Abhängigkeit vom Partialdruck X und der Temperatur

2. Feste Elektrolyte als Funktionswerkstoffe

2.1. Allgemeine Charakteristika

Der Festelektrolyt besteht aus einem polykristallinen Material. Nur solche Ionenkristalle, die unipolare Ionenleitung, d. h. bevorzugte Beweglichkeit für eine Ionenart, haben, sind als langzeitig stabile Festelektrolyte nutzbar.

Ionenkristalle sind bei niedriger Temperatur Isolatoren. Bei niedrigem Partialdruck der nichtmetallischen Komponente X können sie n-Halbleiter, bei hohem Partialdruck von X p-Halbleiter sein (Bild 3). Mit steigender Temperatur wächst die vom Nichtmetallpartialdruck unabhängige Ionenleitung. Die spezifische Ionenleitfähigkeit als Produkt von Beweglichkeit und Defektkonzentration läßt sich gezielt durch Auswahl von Ionengittern mit bevorzugten Beweglichkeiten (kleinen Aktivierungsenthalpien für den Platzwechsel) und durch Erhöhung der Defektkonzentration für die bewegliche Ionensorte auf dem Wege der chemischen Dotierung erhöhen [2].

Außer den elektrischen Eigenschaften müssen die Festelektrolyte als Sensorwerkstoffe auch bestimmte mechanische, chemische und thermische Eigenschaften haben. Im allgemeinen werden die polykristallinen Materialien durch Pressen oder Gießen geformt, vorverdichtet und anschließend durch Sintern verfestigt [3]. Die Anforderungen an die mechanische Festigkeit sind nicht sehr hoch, je nach Anwendungsfall sollte die Biegebruchspannung etwa 50 bis 200 N/mm² betragen. Hohe Temperaturwechselbeständigkeit wird bei bestimmten Anwendungsfällen, z. B. Einsatz in Metallschmelzen, gefordert.

Die Phasenstabilität der Kristallstruktur und die chemische Beständigkeit des Festelektrolyten gegenüber heißen Gasen oder Schmelzen entscheiden über die Stabilität des Meßwertes während der Arbeitszeit des Sensors unter solchen aggressiven Bedingungen [4].

Von größter praktischer Bedeutung sind bisher die Sauerstoffionenleiter. Außer diesen werden Protonenleiter, Halogenionenleiter und Kationenleiter für die Entwicklung von Sensoren genutzt (vgl. die Tafel).

2.2. Sauerstoffionenleiter

Die am häufigsten verwendeten Sauerstoffionenleiter bestehen aus Zirconiumdioxid, in dem durch Zusätze die kubische Phase stabilisiert und die Defektkonzentration erhöht wurde [2]. Die wichtigsten Sauerstoffionenleiter sind im Bild 4 angegeben. Die Hauptentwicklungsrichtung bei den Sauerstoffionenleitern besteht in der Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften von gesinterten FE-Körpern und in der Einführung von Schichttechniken zur Erzeugung von FE-Schichten [3].

2.3. Weitere Ionenleiter

Oxide mit Perovskitstruktur, wie $SrCeO_3$, können Protonen (H^+-Ionen) aus einer wasserstoffhaltigen Gasphase auf Zwischengitterplätzen einbauen, die bei hohen Temperaturen zur Ionenleitung führen. In hydratisierten Oxiden, wie Polyantimonsäure oder Wolframsäure, wird schon bei Zimmertemperatur ausreichende Protonenleitung beobachtet. Beide Typen von Verbindungen nutzt man zur Entwicklung von Sensoren [5] und [6].

Unter den Halogeniden sind die Fluoride als Fluorionenleiter untersucht worden. Besonders solche mit „weich" gebundenen Fluorionen und mit Dotierungen durch Kationen unterschiedlicher Wertigkeit, z. B. PbF_2 mit KF- oder mit BiF_3-Dotierung, zeigen schon oberhalb Zimmertemperatur ausreichende Leitfähigkeit. Auch andere Halogenide (Chloride, Bromide) werden im Labormaßstab als Festelektrolyte verwendet. Bei ihrer Verwendung stört ihre Feuchteempfindlichkeit. Ionenkristalle mit Kationenleitung, wie β''-Aluminiumoxid, NASICON, gemischte Alkali-Erdalkalisulfate oder -carbonate, werden als Elektrolyte für Sensoren untersucht.

Immer dann, wenn das transportierte Ion nicht gleich dem im Elektrodenprozeß ausgetauschten ist, wird die Langzeitstabilität des Festelektrolyten nur bei stromlosem Betrieb gewährleistet.

3. Aufbau von Festelektrolytsensoren und Festelektrolytmeßsystemen

Der Festelektrolyt ist ein gasdicht gesinterter Körper, der das Referenzmedium vom Meßmedium trennt. Er soll die Ionensorte bevorzugt transportieren, die auch in den Elektrodenreaktionen mit Referenz- und Meßmedium ausgetauscht wird. Die Elektroden sind aus einem elektronenleitenden Material, Metall oder Oxid-Halbleiter. Sie müssen den elektrochemischen Umsatz der Komponente X gewährleisten, ohne selbst das Potential im Elektrodenraum zu beeinflussen.

Eine Grundvoraussetzung für den Aufbau von potentiometrischen FE-Zellen ist die dichte Trennung der Elektrodenräume. Referenz- und auch Meßmedium können sowohl gasförmig, schmelzflüssig oder fest sein, sie können stehende oder strömende Medien sein.

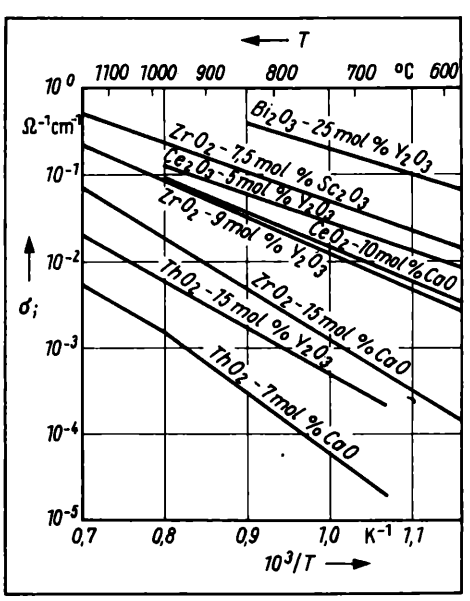


Bild 4. Spezifische elektrische Leitfähigkeiten von Sauerstoffionenleitern

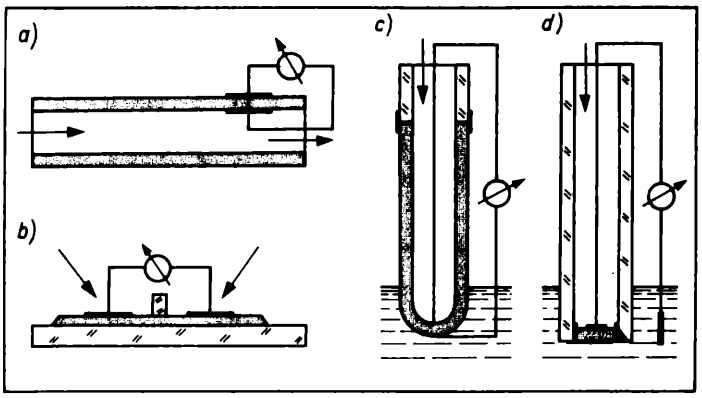


Bild 5. Aufbau potentiometrischer Festelektrolytzellen
a) Gasdurchflußzelle: Festelektrolyt als beidseitig offenes Rohr; b) Schichtzelle: Festelektrolytschicht (Dünn- oder Dickschicht) auf inertem Träger; c) Eintauchzelle: Festelektrolytrohr, einseitig geschlossen (etwa 1 mm Wandstärke); d) Eintauchzelle: Festelektrolyttablette (1 bis 2 mm Dicke) als Boden eines Sondenrohres

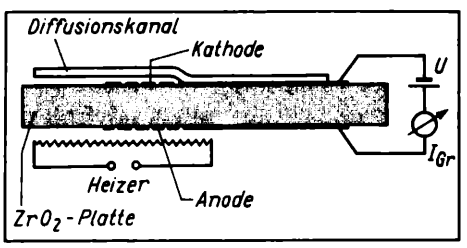


Bild 6. Beispiel eines polarographischen Festelektrolytsensors: Grenzstromsonde zur Lambda-Messung im Kfz-Abgas

Aus diesen Anforderungen ergeben sich die wichtigsten Aufbauvarianten von potentiometrischen FE-Sensoren (Bild 5).
Amperometrische FE-Zellen benötigen kein Referenzmedium. Der Ionenstrom kann je nach der Polarität der angelegten Spannung in beiden Richtungen fließen. Wird er zur coulometrischen Titration einer mit X reagierenden Komponente Y im Meßmedium verwendet, so muß die Meßelektrode die chemische Umsetzung von X mit Y katalysieren. Soll im Gebiet des Diffusionsgrenzstromes gearbeitet werden, dann müssen an der X-verbrauchenden Elektrode (meist Anode) Diffusionsbarrieren für die Komponente X im Meßmedium geschaffen werden, z. B. in Form eines engen Spaltes oder einer porösen Schicht zwischen Meßmedium und Elektrode.
Eine dichte Trennung der Elektrodenräume ist bei den amperometrischen Verfahren nicht erforderlich (Bild 6).
Der Sensor wird entweder durch das Prozeßmedium (Schmelze, heißes Gas) oder durch eine Heizung auf die Arbeitstemperatur aufgeheizt. Die Heizleistung ist abhängig von der Dimensionierung des Sensors. Sie liegt meist in der Größe von 10 bis 100 Watt.
Die Meßwertverarbeitung von FE-Sensoren erfolgt je nach Anwendungsfall unterschiedlich. Für reduzierte Genauigkeitsanforderungen, z. B. in der Konsumgüterindustrie, genügt die analoge Anzeige des elektrischen Signals. In der Prozeßmeßtechnik wird das analoge Signal in ein digitales, zum Rechneranschluß geeignetes gewandelt. Der Rechner bzw. Mikroprozessor hat außer dem Meßwert noch die Temperatur, ggf. Durchfluß, Diffusionsbedingungen u. a. zu verarbeiten. Die periodische Selbstüberprüfung und Korrektur der Kalibrierkurve, z. B. anhand des elektrischen Widerstandes des Sensors oder einer Kalibriermessung, kann vom Rechner gesteuert erfolgen.
Sensor und Auswertetechnik müssen im angemessenen Preisverhältnis zum Anwendungsfall stehen. Es gibt sowohl Wegwerfsensoren, die einmalig für eine Tauchmessung in Metallschmelzen verwendet werden, als auch Langzeitmeßsonden, die mehrere Jahre stabil betrieben werden. Festelektrolytsensoren reagieren sehr selektiv auf die an der Grenzfläche Elektrode/Festelektrolyt austauschbare Komponente. Störungen treten durch Elektrodengifte oder andere Verschmutzungen des Gases (Staub, Öldämpfe) auf. Auf den Festelektrolyten korrosiv wirkende Medien (besonders Metalloxide) führen zu Drifterscheinungen der Sensorfunktion.

4. Anwendungsbeispiele

Festelektrolytsensoren auf der Basis von Zirconiumdioxid wurden in den letzten 15 Jahren in die Produktion eingeführt. Nach den produzierten Stückzahlen dominiert in der Anwendung die Sauerstoffsonde für Stahlschmelzen, gefolgt von Lambda-Sonden zur Kontrolle von Verbrennungsprozessen. Die Nutzung anderer Festelektrolytmaterialien in Sensoren ist dagegen noch im Entwicklungsstadium.
Die hohe thermodynamische Stabilität des Zirconiumdioxids und des Thoriumdioxids ermöglichen Sauerstoffpartialdruck- bzw. Sauerstoffaktivitätsmessungen in einem außerordentlich weiten Bereich, von etwa 10^{-60} Pa Gleichgewichtsdruck, wie er bei Sauerstoffaktivitäten entsprechend einer Konzentration von 1 ppm in flüssigem Natrium herrscht, bis etwa 10^{-7} Pa Sauerstoffdruck. Die Anwendung ist im Temperaturbereich von 300 bis 1800 °C möglich. In diesem pO_2-T-Bereich liegen wichtige technische Anwendungen (Bild 7), von der Messung geringer Sauerstoffgehalte in Kupfer-, Stahl- und anderen Metallschmelzen über Sauerstoffgleichgewichtsdrücke in Reaktions-, Schutz- und Verbrennungsgasen bis zur Atemluftkontrolle.
Bedingt vor allem durch Meßmedien- und Temperatureinflüsse fordert jeder Anwendungsfall eine besondere Sensorkonstruktion. Hier sollen einige wichtige Anwendungsbeispiele erläutert werden.

4.1. Sauerstoffmessung in Stahlschmelzen

In den letzten zehn Jahren hat sich die Festelektrolytmethode bei Prozessen der Stahlerzeugung als besonders nützlich eingeführt, in denen der Sauerstoffgehalt unmittelbar beeinflußt wird: beim Frischen, Desoxydieren, Entschwefeln u. a. technologischen Schritten, insbesondere im Konverter und in der Pfannenmetallurgie. Dort ist die sekundenschnelle Direktmessung des Sauerstoffgehalts mit wesentlichen Verkürzungen der Haltezeiten, Einsparungen von Energie und Legierungszusätzen sowie Qualitätserhöhungen verbunden.
Die Meßlanze mit dem Zirconiumdioxid-Sensor und einem Thermoelement am Kopf wird mit Hand oder automatisch in die Schmelze getaucht. Sie liefert etwa 5 Sekunden lang eine stabile Zellspannung und gleichzeitig die aktuelle Temperatur, aus denen kalibrierfrei der Sauerstoffgehalt der Schmelze mittels Mikroprozessor errechnet wird. Die Auswerteelektronik schließt gleichzeitig Fehlmessungen aus. Je nach dem technologischen Zustand der Schmelze beträgt der Sauerstoffgehalt wenige ppm oder einige 100 bis 1000 ppm. Die Temperatur der Schmelze liegt zwischen 1600 und 1750 °C, häufig ist die Schmelze bewegt. Ein besonderes Entwicklungsproblem des Sensors ist deshalb das Erreichen einer hohen Temperaturwechselbeständigkeit und mechanischen Festigkeit der Zirconiumdioxid-Keramik [4].

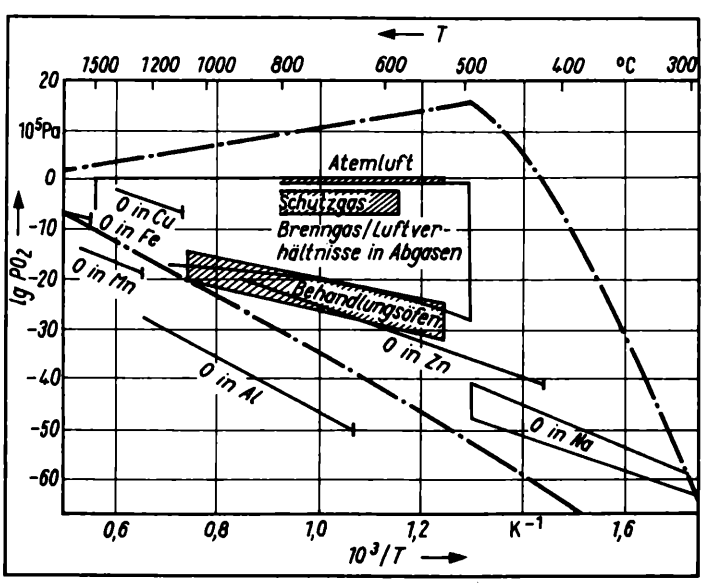


Bild 7. Anwendungsbereich von ZrO_2- und ThO_2-Festelektrolytsensoren

4.2. *Sauerstoffmessung in Kupferschmelzen*

Sauerstoffgehalte im Kupfer können zwischen etwa 5 ppm (OF-Kupfer) und 2000 ppm (Anoden-Kupfer) liegen. Sie bestimmen die Materialeigenschaften des Kupfers. Ihre unmittelbare Kontrolle im technologischen Prozeß bei Temperaturen von 1200 bis 1300 °C ist deshalb von Bedeutung [4] und [9].
Festelektrolytsonden mit Zirconiumdioxid sind bereits im Angebot. Sie liefern über einige 10 Stunden auswertbare Potentiale. Ihre weitere Verbesserung bez. Korrosions- und T-Wechselbeständigkeit steht als Entwicklungsaufgabe, um zuverlässige Meßwertgeber für die automatische Kontrolle und Steuerung zu erhalten.

4.3. *Sauerstoffmessung in flüssigem Natrium*

In Wärmeträgerkreisläufen mit flüssigem Natrium, wie sie in der Kernenergetik verwendet werden, müssen Sauerstoffgehalte von 0,5 bis 100 ppm im Flüssigmetall kontrolliert werden. Die chemischen Bedingungen im Meßmedium verlangen die Verwendung von Thorium-Yttriumoxid als Festelektrolyt. Die Festelektrolytsonde arbeitet ein bis zwei Jahre im kontinuierlichen Betrieb bei konstant gehaltener Temperatur von 400 °C bei einem Druck im Wärmeträgerkreislauf von 0,1 bis 0,5 MPa. Das Natrium strömt an der Sonde mit 0,1 1 m^3/h vorbei. Der Konzentrationskoeffizient beträgt (55 ± 5) mV/Dekade Änderung der Sauerstoffkonzentration. Konzentrationsänderungen werden in wenigen Sekunden angezeigt [10].
Die Sonde ist auch in anderen Metallschmelzen im Temperaturbereich von 300 bis 550 °C anwendbar.

4.4. *Brenngas/Luft-Verhältnismessung*

Jede Brennstoffart (Gas, Öl, Kohle) und jede Verbrennungsanlage (Dampferzeuger, Glaswannen, Sinteröfen) verlangen bestimmte Brenngas/Luft-Verhältnisse für eine optimale Verbrennung. Mit Hilfe der unmittelbar im Verbrennungsraum oder Abgaskanal arbeitenden Festelektrolytsensoren kann das Brenngas/Luft-Verhältnis schnell erfaßt und für Regelaufgaben bereitgestellt werden.
Diese Meßtechnik (Ursalyt G 40 vom *VEB Junkalor Dessau*) wurde in den Großkraftwerken der DDR eingeführt. Sie ist auch in kleineren Verbrennungsanlagen anwendbar und führt zu erheblichen Brennstoffeinsparungen und damit zur Senkung der Umweltbelastung.
Mit Festelektrolytsonden wurde bei Verwendung bleifreien Benzins die direkte Messung des Luft/Kraftstoff-Verhältnisses (Lambda-Zahl) im Kfz-Abgas möglich. Zuerst wurde der Potentialsprung bei $\lambda = 1$ zur Einstellung stöchiometrischer Verhältnisse als optimale Bedingung für die Entgiftung mit Katalysatoren genutzt. In den letzten Jahren werden Lambda-Sonden auch für den Magerbereich (Luftüberschuß) entwickelt. Sie sollen der optimalen Leistungsregelung bei Minimierung des Kraftstoffverbrauchs dienen [11]. Dabei werden sowohl potentiometrische (bis $\lambda = 1{,}5$) als auch Diffusionsgrenzstromsonden (bis $\lambda = 2$) auf ZrO_2-Basis verwendet. Die Ansprechzeiten liegen bei einigen 100 ms. Reproduzierbarkeit und „Alterungsempfindlichkeit" — verursacht durch Verschmutzungen — müssen noch verbessert werden, um diese Sonden zukünftig serienmäßig für die Gemischregelung verwenden zu können.

4.5. *Sauerstoffmessung in Behandlungsgasen*

Zur Oberflächenvergütung werden Stahlteile in Industrieöfen in Gasatmosphären einer Wärmebehandlung unterzogen. Je nach der Zusammensetzung des Gases unterscheidet man das Carburieren, das Oxycarbonitrieren, das Oxynitrieren, wobei Kohlenstoff und/oder Stickstoff in der Stahloberfläche angereichert werden. Die Prozesse werden bei Temperaturen von 600 bis 1100 °C über viele Stunden durchgeführt. Die Schaffung und Kontrolle optimaler Prozeßbedingungen spart Zeit und Energie und erhöht die Produktqualität. Auf der Grundlage von Festelektrolytsonden wurden in den letzten Jahren Meßverfahren für diese Prozesse entwickelt (Ursalyt G 50 vom *VEB Junkalor Dessau*). Sie basieren auf der potentiometrischen Messung des Sauerstoffpotentials, das im Verhältnis zu den Redoxgleichgewichten in den entsprechenden Gasphasen bzw. auf den Metalloberflächen steht. Mit Hilfe vorgeschalteter Katalysatoren gelingt auch die Messung des Dissoziationsgrades von Ammoniak in den Behandlungsgasen [12].

4.6. *Konzentrationsbestimmung von mit Sauerstoff reagierenden Komponenten*

Mit Hilfe der FE-Coulometrie werden oxidierbare Komponenten, wie H_2, CO, CH_4 u. a., in Gasen meßbar. Für die Endpunktanzeige der Titration wird eine potentiometrische FE-Zelle benutzt (Ursalyt G 30 des *VEB Junkalor Dessau*) [13].
Mit Hilfe dieses Verfahrens können auch feste Stoffe, die mit einem Trägergas im O_2-Austausch stehen, untersucht werden. So ist es möglich, Stöchiometrieabweichungen in halbleitenden Oxiden, Restmetallgehalte in Oxid- oder Nitridkeramiken, die Löslichkeit bzw. Durchlässigkeit von Materialien für Wasserstoff u. a. zu bestimmen.

4.7 *Anwendungen weiterer Festelektrolytsensoren*

Mit protonenleitenden Festelektrolyten wurden im Labormaßstab Sensoren zur Messung von Wasserstoff im Bereich von 10^5 bis 10^2 Pa aufgebaut [5] und [6]. Diese Festelektrolyte liefern nur in reduzierender Atmosphäre der Nernstschen Gleichung entsprechende Zellspannungen. Sie stellen jedoch für Spuren von H_2 in Luft brauchbare qualitative Indikatoren dar.
Sensoren auf der Basis von Halogenionenleitern wurden ebenfalls im Labormaßstab zur Messung von Halogenpartialdrücken in Gasen demonstriert. Mit $PbSnF_4$-Sensoren konnten je nach verwendeter Elektrodenschicht verschiedene Gase wie O_2, H_2, NH_3 schon bei Zimmertemperatur gemessen werden [7].
Auch Kationenleiter wurden im Labormaßstab für den Sensoraufbau genutzt. Genannt seien so bedeutende Versuche, wie die Analyse von SO_x-Spuren in Luft mit Hilfe von Sulfat-Elektrolyten [8] und [14] oder die CO_2-Analyse in Atemluft mit Carbonat-Elektrolyten [8] und [15].

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Festelektrolytsensoren sind geeignete On-line- oder In-situ-Meßverfahren für die Kontrolle von Gasen, besonders des Sauerstoffpartialdrucks in Gasen oder Metallschmelzen. Auch für andere gasförmige Komponenten werden Festelektrolytsensoren entwickelt.
Festelektrolytsensoren werden als potentiometrische Zellen oder als Stromsonden (amperometrische, coulometrische, polarographische Verfahren) aufgebaut.
Die in der Praxis angewendeten Festelektrolyte bestehen überwiegend aus stabilisierter Zirconiumdioxidkeramik, einem Sauerstoffionenleiter. Protonenleiter, Halogenionenleiter oder Kationenleiter werden im Labormaßstab für den Aufbau von Sensoren verwendet.
Festelektrolytsensoren arbeiten meist bei erhöhten Temperaturen. Das macht sie für die direkte Kontrolle von Verbrennungsvorgängen, metallurgischen Prozessen und Gasreaktionen besonders geeignet. Für eine Reihe wichtiger Prozesse stehen Festelektrolytmeßverfahren zur Verfügung. Dazu gehören die Kontrolle und Steuerung der optimalen Zusammensetzung von Verbrennungsvorgängen in der Energetik, die Sauerstoffkontrolle und -einstellung in der Schwarz- und Kupfermetallurgie, die Kontrolle und Steuerung von Wärmebehandlungsprozessen der metallverarbeitenden Industrie und anderes.
Durch die Produktion und Weiterentwicklung von Festelektrolytkeramik und von Festelektrolytmeßtechnik wurden in der DDR günstige Bedingungen für weitere Anwendungen dieser modernen Meßverfahren geschaffen.

Literatur

[1] Nernst, W.: Über die elektrolytische Leitung fester Körper bei sehr hohen Temperaturen. Z. Elektrochemie 6 (1899) S. 41.
[2] Ullmann, H.: Eigenschaften und Anwendungen von Oxidionenleitern. Hermsdorfer Techn. Mitt. 69 (1986), S. 2205.
[3] Ullmann, H.: Керамики как функтиональные материалы для химических датчиков (Keramiken als Funktionsmaterialien für chemische Sensoren). Trudy VNI Analit. Kiev: Priborov (im Druck).

[4] JANKE, D.; LINDENBERG, H.-U.; MAHN, G., u. a.: Elektrochemische Sauerstoffmessung in der Metallurgie. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1985.
[5] IWAHARA, H.; UCHIDA, H.: High-temperature type proton conductive ceramics and their application to galvanic cell type gas sensors. In: Chemical Sensors, Analyt. Chem. Symp. Ser., 17 (1983), p. 227.
[6] GORODYSKI, A. V.; KARASSEVA, T. A.; MATIASEVICH, A. M., u. a.: IX. Allunionskonferenz zur physikalischen Chemie und Elektrochemie von Ionenschmelzen und festen Elektrolyten, Swerdlowsk, 20.—22. 10. 1987, Tagungsband, Teil III, S. 111.
[7] COUTURIER, G.; DANTO, Y.; PORTIER, J.; SALARDENNE, J.: Influence of various gases on the electrical properties of the interface metal/fluorine ion conductor. Application to gas sensors. In: vgl. [5], p. 357.
[8] MÖBIUS, H.-H.: Fundamentals and problems of galvanic gas analytical cells with oxoanionic solid electrolytes. Vortrag Internat. Symp. on Systems with Fast Ionic Transport, Smolenice/ČSSR, 1. bis 4. April 1985, p. 26.
[9] LOCKYER, P. C.; HENS, L. J.: Sauerstoffbestimmung beim Gießen von Kupfer mit der Oxycell-Methode. Neue Hütte 20 (1975) 3, S. 166—169.
[10] ULLMANN, H.; LANG, H.-J.; RICHTER, W.; KOZLOV, F. A., u. a.: Results of the development of electrochemical cells for the detection of oxygen activities in liquid sodium, liquid metal engineering and technology. London: BNES 1984, p. 387.
[11] WIEDEMANN, H. M.: Aufbau und Funktion von Lambda-Sonden für mageres Abgas. VDI-Berichte 578 (1986), S. 129.
[12] TESKE, K.; BÖHMER, S.; BERG, H.-J.; RICHTER, V.: Verfahren und Vorrichtung zur Kontrolle ammoniakhaltiger Gase. WP-DDR 252 849 0, 252 850 5, 252 851 3 vom 4. Juli 1983.
[13] TESKE, K.; GLÄSER, W.: Verfahren zur coulometrischen Bestimmung geringer Wasserstoffgehalte in Gasen. Microchim. Acta (1975) S. 653.
[14] WORELL, W. L.; LIU, Q. G.: The application of solid sulfate electrolytes in SO_2/SO_3 Sensors. In: vgl. [5], p. 332.
[15] GAUTHIER, M.; BELANGER, A.; FAUTEUX, D.; BALE, C.; COTE, R.: Solid carbonate electrolytes for the potentiometric measurement of carbon oxides and carbon bearing materials. In: vgl. [5], p. 353.

msr 8881

G. Linß, P. Brückner, C.-B. Nopper

CCD-Liniensensoren zur berührungslosen Längenmessung

0. Einleitung

Industrielle Qualitätsmeßtechnik INQUAMESS hat die Aufgabe, unscharfe Qualitätsvorstellungen durch meßbare Größen oder ihre meßbaren Stellvertreter exakt zu beschreiben und mit vorgegebenen Normalen zu vergleichen.
Die rechnerintegrierte Fertigung CIM (computer integrated manufacturing) erfordert die zunehmende Automatisierung, Objektivierung und Ökonomisierung der industriellen Qualitätsmeßtechnik [1]. Die Entwicklung und Applikation von Basistechnologien der Mikroelektronik schafft günstige Bedingungen für die technische Realisierung automatisierungsfreundlicher berührungsloser Längenmeßprinzipe (Bild 1) [2].
In diesem Zusammenhang erlangen Meßsysteme auf der Basis von CCD-Liniensensoren (charge coupled devices) zunehmende Bedeutung. Sie zeichnen sich durch parallele Meßwertaufnahme, berührungslose Antastung, hohe Meßgeschwindigkeit, geringe Meßunsicherheit, große Flexibilität und hohe Meßökonomie aus.

Doz. Dr. sc. techn. GERHARD LINSS (39) studierte von 1968 bis 1972 Technologie für den Wissenschaftlichen Gerätebau an der Friedrich-Schiller-Universität (FSU) Jena. 1979 Promotion A (Kostenoptimierte statistische Verfahren für die Fertigungsprüfung), 1986 Promotion B (Rechnergestützte objektivierte industrielle Qualitätsregelung), jeweils an der FSU Jena. Von 1979 bis 1983 Leiter des betrieblichen Meßwesens und einer meßtechnischen Prüfstelle des ASMW im VEB Feinmeßzeugfabrik Suhl. Seit 1983 Bereichsleiter im Fachbereich Prüftechnik an der TH Ilmenau, Sektion Gerätetechnik.
Dr.-Ing. PETER BRÜCKNER (36) studierte von 1971 bis 1975 theoretische Elektrotechnik an der TH Ilmenau. Ab 1975 Forschungsstudium an der TH Ilmenau mit Abschluß Promotion A. Danach wissenschaftlicher Assistent an der TH Ilmenau. Seit 1983 wissenschaftlicher Oberassistent im Bereich Prüftechnik des Technikums Suhl.
Dipl.-Ing. CARL-BERNHARD NOPPER (27) studierte von 1982 bis 1987 Gerätetechnik an der TH Ilmenau. Seitdem Ingenieur für Lehre und Forschung am Technikum Suhl, Bereich Prüftechnik.

1. CCD-Liniensensoren

Ein Sensor (Meßfühler, Meßgrößenaufnehmer, Aufnehmer, Meßwandler) ist der Teil eines Meßsystems, der eine Meßgröße (Eingangsgröße, Eingangsmeßsignal) in ein Zwischensignal umformt [3].
Optoelektronische CCD-Sensoren enthalten eine Maßverkörperung (Pixelraster). Meßprinzip ist die Umformung der optischen Bildinformation der einzelnen Elemente des CCD-Liniensensors. Die elektrischen Zwischensignale der einzelnen Elemente sind mit Hilfe einer nachgeschalteten spezifischen Informationsverarbeitungseinheit auswertbar (Bild 2) [4].
Damit wird das berührungslose „Messen im Bild" ermöglicht [5]. Wegen der hohen Auflösung und der hohen Meßraten werden CCD-Liniensensoren besonders ökonomisch zur Lösung von Aufgaben der Weg-, Längen- und Winkelmeßtechnik sowie daraus ableitbaren Meßgrößen der Form und Lage eingesetzt. Bevorzugt kommen berührungslose, direkte und indirekte Meßmethoden zur Anwendung.
Mit CCD-Liniensensoren lassen sich mehr Meßinformationen zu einem niedrigeren Preis gewinnen als mit konventioneller Fertigungsmeßtechnik. Ein Maß dafür ist die Meßinformationsqualität [6]:

$$Q = \mathrm{ld}\,\dot{m}/(t_E \cdot K) \quad \text{in bit/(s} \cdot \text{Mark)}\,.$$

Q Meßinformationsqualität; ld binärer Logarithmus; $\dot{m}$ maximales metrologisches Auflösungsvermögen; t_E Einstellzeit; K Kosten

Beispielsweise beträgt die Meßinformationsqualität des inkrementalen Feinzeigers 4071 (Hersteller *VEB Feinmeßzeugfabrik Suhl*) mit 10 mm Meßbereich 10^{-3} bit/(s · Mark). Die Meßinformationsqualität des CCD-Liniensensors L 143 C (Hersteller *VEB Werk für Fernsehelektronik Berlin*) beträgt 1 bit/(s · Mark).
Eine Übersicht der wichtigsten technischen Parameter von CCD-Liniensensoren einiger ausgewählter Hersteller enthält Tafel 1. Einige Hersteller bieten auch Sonderbauformen, wie kreis-, kreuz- oder sternförmige CCD-Sensoren an.

2. CCD-Linienkameras

Für den Betrieb der CCD-Liniensensoren ist die Bereitstellung der erforderlichen Ansteuertakte und die rechnerkompatible Aufbereitung der Ausgangssignale notwendig.
Eine CCD-Linienkamera besteht aus den Funktionsgruppen: optische Baugruppe, CCD-Liniensensor, Takterzeugung, Analogsignalverarbeitung und Interface (Bild 3).
Für praktische Anwendungen haben sich Ausführungen mit räumlich abgesetztem Sensorelement (Kamerakopf) und Ausführungen mit räumlich integriertem Sensorelement (Kompaktkamera) bewährt.
Abgesetzte Ausführungen enthalten nur die unmittelbar zum Betrieb des CCD-Liniensensors notwendigen Baugruppen und Schaltungskomponenten zur Signalübertragung und zeichnen sich durch geringe Masse und geringes Volumen aus. Für ihren Betrieb ist eine Steuerbaugruppe als Steckeinheit für Rechner oder als separates Betriebsgerät notwendig.
Integrierte Ausführungen enthalten alle Funktionsgruppen einer CCD-Linienkamera und zeichnen sich durch kurze Signalübertragungswege und standardisierte Interfaces aus. Für ihren Betrieb ist ein Stromversorgungsgerät notwendig.
Für die automatisierte berührungslose Längenmessung in der flexiblen automatischen Fertigung CAM stehen eine Reihe von CCD-Linienkameras zur Verfügung (Tafel 2) [7]. In Tafel 2 sind A4-Entwicklungsmuster der *TH Ilmenau* enthalten, die den fortgeschrittenen internationalen Stand repräsentieren und in Pilotserien an der *Sektion Gerätetechnik, Technikum Suhl*, gefertigt werden [8].

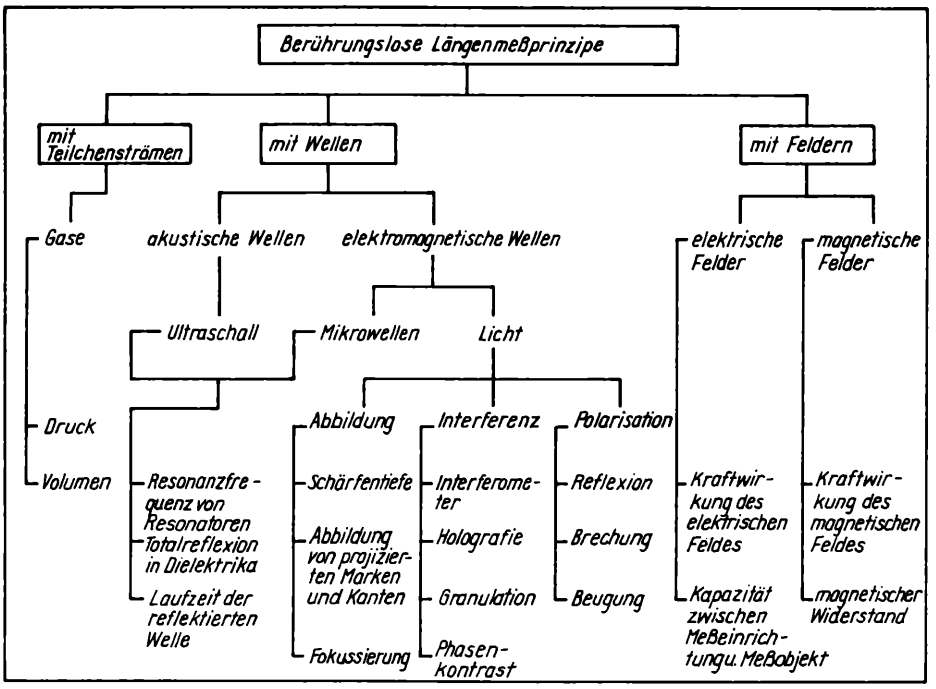


Bild 1. Übersicht berührungsloser Längenmeßprinzipe

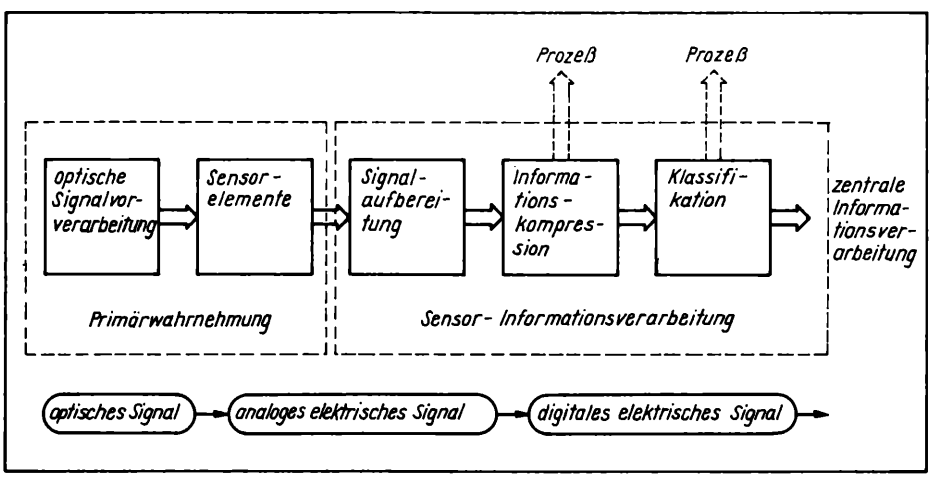


Bild 2. Struktur eines optoelektronischen Sensors

3. Berührungslose Meßverfahren mit CCD-Linienkameras

3.1. Klassifikation der Meßverfahren

Ein Meßverfahren ist die praktische Anwendung von Meßprinzip und Meßmethode zur Gewinnung von Meßwerten [3].
Es wird zwischen indirekten und direkten berührungslosen Meßverfahren mit CCD-Linienkameras unterschieden (Bild 4).
Bei indirekten Meßverfahren werden CCD-Liniensensoren als Positionsaufnehmer in einem sensorexternen Koordinatensystem angewendet. Bei direkten Meßverfahren wird die sensorinterne Meßverkörperung direkt mit dem Bild des Meßobjektes verglichen. Zweidimensionale Messungen lassen sich durch eine definierte translatorische Relativbewegung zwischen CCD-Liniensensoren und Meßobjekt oder deren optische Realisierung (beispielsweise Spiegelbewegungen) durchführen.
Durch eine zusätzliche definierte rotatorische Bewegung eines zwischen Spitzen aufgenommenen Meßobjektes kann eine dreidimensionale Messung für bestimmte Klassen von Meßobjekten realisiert werden (Bild 4) [9].

Tafel 1. CCD-Liniensensoren ausgewählter Hersteller

Typ	Pixelanzahl n_{BP}	Pixelmaße µm × µm	Länge mm	Bildfrequenz kHz	Hersteller/Land
TC 102	128	12,7 × 12,7	1,626	80,0	*Texas Instruments*/
TC 101	1728	12,7 × 12,7	21,946	6,0	USA
TC 103	2048	12,7 × 12,7	26,010	5,0	
TC 104	3456	10,7 × 10,7	36,979	2,5	
CCD 110	256	13 × 17	3,328	40,0	*Fairchild*/USA
CCD 133	1024	13 × 13	13,312	20,0	
CCD 143	2048	13 × 13	26,624	10,0	
L 110 C	256	13 × 17	3,328	40,0	*VEB Werk für*
L 172 C	512	23 × 480	11,776	2,0	*Fernsehelektronik*
L 133 C	1024	13 × 13	13,312	20,0	*Berlin*/DDR
L 143 C	2048	13 × 13	26,624	10,0	
TCD-101C-1	1728	—	—	2,5	*Toshiba*/Japan
TCD-102C	2048	—	—	2,5	

3.2. Maßnahmen zur Verringerung der Meßunsicherheit

Die erreichbare Meßunsicherheit ist abhängig vom Informationsgehalt H_{BI} des Bildes:

$$H_{BI} = n_{BP} \cdot \mathrm{ld}\, k\,.$$

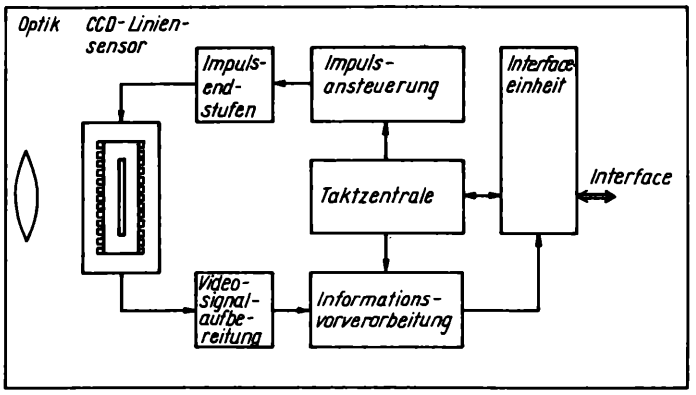


Bild 3. Struktur einer CCD-Linienkamera

n_{BP} Pixelanzahl des CCD-Liniensensors; k Anzahl der unterscheidbaren Spannungsamplituden eines Pixels (Graustufen)

Eine Erhöhung der Pixelanzahl n_{BP} von CCD-Liniensensoren hat stärkeren Einfluß auf den Informationsgehalt H_{BI} des Bildes als eine Erhöhung der Anzahl der Graustufen [10].

Die Binärsignalverarbeitung der Bildinformation erfolgt bezogen auf eine Komparatorspannung als binäre Entscheidung zwischen „beleuchtet" und „nicht beleuchtet". In diesem Fall entspricht der Informationsgehalt H_{BI} des Bildes der Pixelanzahl n_{BP} (Tafel 1).

Die Grauwertsignalverarbeitung der Bildinformation durch Digitalisierung der analogen Videosignale der Pixel des CCD-Liniensensors erfolgt durch das Verfahren der fotoelektrischen Mitte und nutzt mehr Bildinformationen [11]. Mit steigender Anzahl von Graustufen wirken sich die unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Pixel in immer stärkerem Maße auf das Meßergebnis aus. Daher erfordern

Tafel 2. CCD-Linienkameras ausgewählter Hersteller

Typ	Pixelanzahl n_{BP}	Abmessungen	Masse kg	Bild-frequenz kHz	Interface	Hersteller/Land	Preis M
Zeilenfernsehkamera ZFK 1021	256	∅ 72 mm, l = 160 mm	0,6	15	K 1520 Bus über STE 1010	*STTB*/DDR[1])	10000,—
Zeilenfernsehkamera ZFK 1040	1024	∅ 72 mm, l = 160 mm	0,6	10	K 1520 Bus über STE 1011	*STTB*/DDR	6000,—
Zeilenfernsehkamera ZFK 1031	1024	200 × 95 × 55 mm³	1,0	10	seriell	*STTB*/DDR	3000,—
Linienkamera CCD 1200 R	512	∅ 57 mm, l = 135 mm	etwa 0,3	37	control unit	*Fairchild*/USA	—
Linienkamera CCD 1300 R	1024	∅ 57 mm, l = 135 mm	etwa 0,3	19	control unit	*Fairchild*/USA	—
Linienkamera CCD 1500 R	2048	∅ 57 mm, l = 135 mm	etwa 0,3	9,7	control unit	*Fairchild*/USA	—
Linienkamerakopf LKK 256	256	48 × 29 × 17 mm³	0,045	4	K 1520 Bus über KSP 3001	*THI*/DDR[2])	2000,—
Linienkamerakopf LKK 1024	1024	∅ 50 mm, l = 130 mm	0,38	2,5	K 1520 Bus über KSP 3001	*THI*/DDR	5000,—
Linienkamerakopf LKK 2048	2048	50 × 50 × 20 mm³	0,07	1	K 1520 Bus über KSP 3001	*THI*/DDR	8000,—
Zeilenfernsehkamera ZFK 1030.1	1024	200 × 95 × 55 mm³	0,7	20	parallel	*THI*/DDR	12000,—
Zeilenfernsehkamera ZFK 1030.2	2048	200 × 95 × 55 mm³	0,7	10	parallel	*THI*/DDR	18000,—
Intelligente Linienkamera ILK 01	256	180 × 100 × 65 mm³	0,6	0,5	seriell	*THI*/DDR	28000,—
Intelligente Linienkamera ILK 02	1024	200 × 95 × 55 mm³	0,7	0,5	seriell, V.24 RS 232 C	*THI*/DDR	25000,—

[1]) *STTB VEB Studiotechnik Berlin;* [2]) *THI Technische Hochschule Ilmenau*

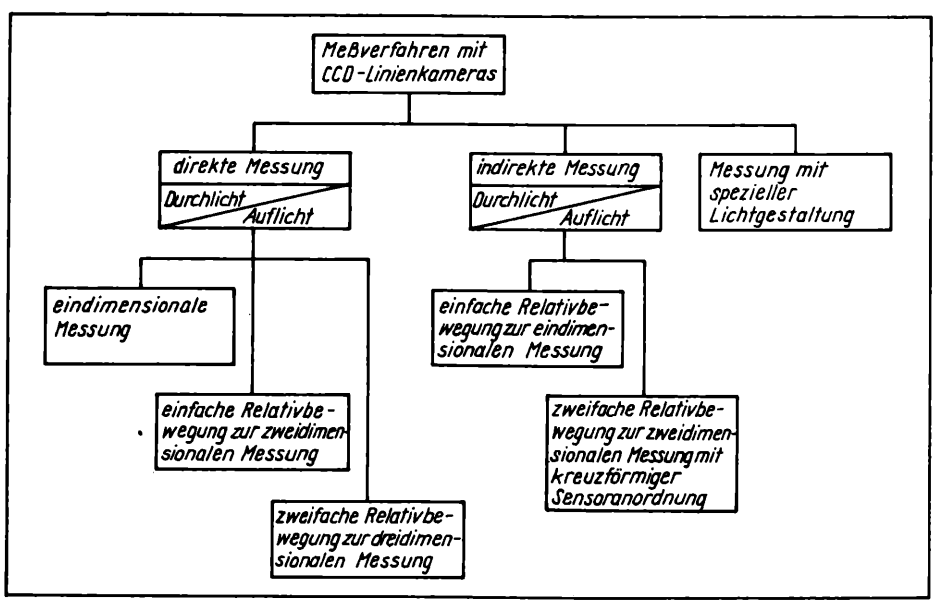
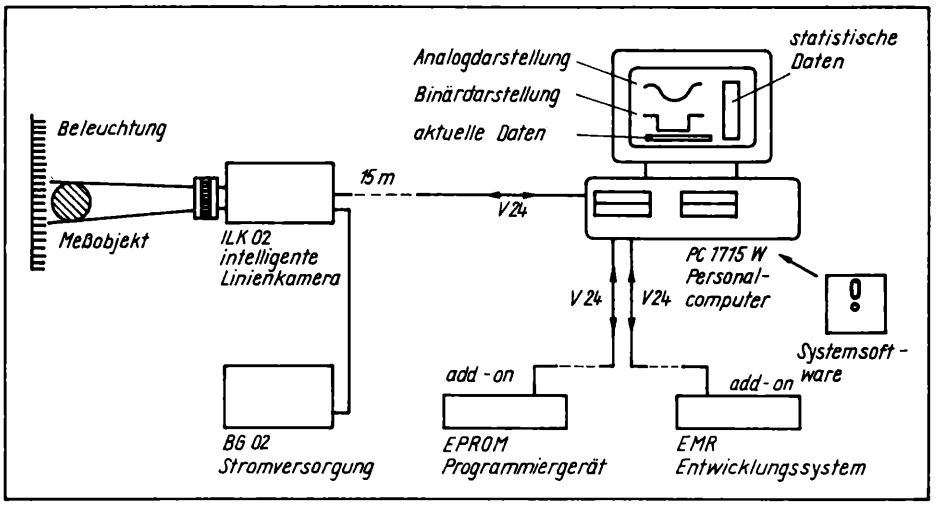


Bild 4. Berührungslose Längenmeßverfahren mit CCD-Linienkameras

Bild 5. Autonomes Wegmeßsystem AUTOMESS



hochwertige Verfahren der Subpixelauflösung eine Hellsignalkorrektur [11].

Gegenwärtig bestimmen CCD-Liniensensoren mit maximal 4096 Bildpunkten mit einem Pixelraster von 13 µm und Video-Analog-Digital-Umsetzer mit 8 bit Umsetzbreite und 19 MHz Umsetzrate den Stand der CCD-Meßtechnik. Durch Grauwertsignalverarbeitung läßt sich das Auflösungsvermögen auf 1/100 des Pixelrasters steigern. Damit werden Meßunsicherheiten bis 10^{-5} erreicht [5]. Messungen mit CCD-Liniensensoren werden durch eine Reihe anderer Faktoren beeinflußt.

Beleuchtung

Zur Anwendung können Hellfeld-, Dunkelfeld- sowie Auflicht- und Durchlichtverfahren kommen [4].

Dabei sind besondere Forderungen an:

- zeitliche und örtliche Gleichmäßigkeiten
- Bestrahlungsstärke
- Spektralbereich

zu stellen.

Zur Verringerung der Meßunsicherheit haben sich folgende Maßnahmen bewährt:

- Betrieb einer Lichtquelle mit Gleichstrom hoher Konstanz
- Einhaltung einer konstanten Beleuchtungsapertur
- Anwendung von monochromatischem kurzwelligem Licht
- maximale Amplitude des Videosignals.

Eigenschaften des Meßobjektes

Die Eigenschaften des Meßobjektes haben Einfluß auf die erreichbare Meßunsicherheit.

Insbesondere sind das:

- Geometrie (Maß, Form, Höhe des Meßobjektes in Antastrichtung)
- Oberfläche (Reflexion, Polarisation, Farbe)
- Kantenqualität (Rechtwinkligkeit, Sauberkeit, Rundung)
- Lage des Meßobjektes relativ zum CCD-Liniensensor.

Zur Verringerung der Meßunsicherheit haben sich folgende Maßnahmen bewährt:

- definierte reproduzierbare Aufnahme des Meßobjektes
- zu messende Objektkanten müssen sich in einer Ebene befinden
- ausreichender Kontrast des Bildes
- unterschiedliche Kantenqualitäten müssen bei der Kalibrierung des CCD-Meßsystems berücksichtigt werden.

Optischer Aufnahmekanal

Die abbildenden optischen Systeme müssen geringe

- Verzeichnungen
- Toleranzen
- chromatische Vergrößerungsdifferenzen
- Bildfeldwölbungen

aufweisen.

Hardware

Die Hardware zur Verarbeitung der analogen Videosignale von CCD-Liniensensoren muß vor allem

- hohes Signal-Rausch-Verhältnis
- konstante Verstärkung
- minimale Temperaturdrift
- minimale Fehler bei der AD-Umsetzung

gewährleisten.

Software

Die Software zur Auswertung der Bildinformation muß

- eine objektive Einstellung von Verfahrensparametern gewährleisten (Integrationszeit, Fokussierung, Kriterium für den Kantenort)
- die grafische Darstellung der Bildinformation des Meßobjektes gewährleisten
- metrologisch geprüft sein
- eine Kalibrierung ermöglichen
- eine Mittelwertbildung aus mehreren Messungen ermöglichen.

Eine verständliche selbstdokumentierende Software mit problemorientierten Programmablaufplänen schließt grobe Meßfehler aus.

3.3. Gerätesysteme zur berührungslosen Längenmessung

System AUTOMESS

Das System AUTOMESS stellt ein autonomes Wegmeßsystem, bestehend aus Systemhardware, intelligenter Linienkamera ILK 02 mit Betriebsgerät BG 02 und Systemsoftware dar. Die intelligente Linienkamera übernimmt die Aufgaben berührungslose Meßwertaufnahme, Meßwertverarbeitung und Steuerung des seriellen Interfaces. Das Betriebsgerät dient der Stromversorgung. Damit steht eine Gerätekonfiguration zur Verfügung, mit der eine große Klasse längenmeßtechnischer Aufgaben mit einem günstigen Kosten/Nutzen-Verhältnis zu bewältigen ist. Aufgrund der hohen Arbeitsgeschwindigkeit von maximal 500 Bildern/s, ist es insbesondere für die Inprozeßmessung und für die Qualitätssicherung an kontinuierlich arbeitenden Anlagen geeignet. Als Einrichtungs- und Entwicklungsrechner sind Personalcomputer vorgesehen (Bild 5). Das System AUTOMESS ist aufwärtskompatibel zum System OPTOMESS.

System OPTOMESS

Sowohl für den experimentellen Forschungsprozeß als auch für den Aufbau von CAQ-Lösungen zur prozeßnahen Qualitätssicherung ist die Bereitstellung von CCD-Linienkameras allein im allgemeinen nicht ausreichend. Erforderlich sind komplette Lösungen mit Meßwertaufbereitung und -auswertung, die auch die Elemente der Szenenbeleuchtung und Meßobjektpositionierung berücksichtigen.

Das System OPTOMESS ist geeignet zur ein- oder mehrdimensionalen optoelektronischen Längenmessung mit höchstmöglicher Auflösung. Es besteht aus den Komponenten CCD-Linienkamera, Personalcomputerinstrument, Personalcomputer und Systemsoftware.

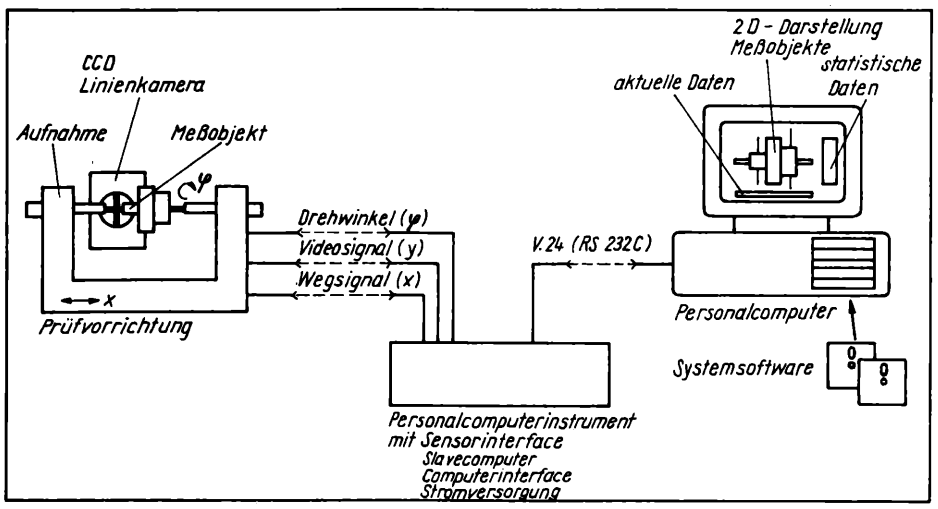


Bild 6. Optoelektronische Meßstation OPTOMESS

Das Personalcomputerinstrument ist modular aufgebaut und durch Steckeinheiten erweiterbar. Ansteuerbaugruppen für translatorische und rotatorische Positionierung [12] stehen zur Verfügung, so daß beispielsweise eine Meßvorrichtung für rotationssymmetrische Teile ansteuerbar ist (Bild 6).

Darüber hinaus ist durch Anschluß weiterer Sensoren über entsprechende Steckeinheiten eine Mehrstellenmessung realisierbar. Eine Ausbaustufe stellt die Benutzung mehrerer Personalcomputerinstrumente, die ring- oder sternförmig mit dem Personalcomputer verbunden sind, dar.

4. Applikationsbeispiele

CCD-Linienkameras werden für unterschiedlichste Meß- und Erkennungsaufgaben bereits erfolgreich industriell eingesetzt. Der Schwerpunkt liegt auf dem Gebiet der Längenmeßtechnik mit Objektfeldausdehnung von 10 m bis 10 mm und Toleranzforderung von ± 10 mm bis $\pm 0{,}01$ mm. Ein Beispiel mit hohem ökonomischen Effekt ist die Optimierung des Zuschnittes von Roheisen im *VEB Maxhütte Unterwellenborn*. Da glühendes Roheisen einer berührenden Messung nicht zugänglich ist, wurde es mit Hilfe von CCD-Linienkameras erstmalig möglich, die Maße von Walzgut unmittelbar im Walzprozeß zu bestimmen. Mit einer CCD-Linienkamera wird die Gesamtlänge des zu teilenden Roheisenblockes in einem Meßbereich $\leqq 20$ m und mit einer Toleranz von ± 50 mm bestimmt. Ein Computer übernimmt die Optimierung des Zuschnitts unter Minimierung der Restlänge bei vorgegebenen Teillängen. Eine zweite CCD-Linienkamera steuert den anschließenden Arbeitsgang an einer Blockschere.

Die entsprechende Hard- und Software wurde an der *TH Ilmenau*, Sektion Gerätetechnik, entwickelt und gefertigt. Die in den *VEB Maxhütte Unterwellenborn* übergeleitete Lösung hat sich seit einem Jahr bewährt und bewirkt einen jährlichen Nutzen von etwa 400000 M.

Als Beispiel aus dem Bereich der Feinmechanik ist der Radsatzprüfautomat im *VEB PIKO Sonneberg* zu nennen. Mit Hilfe von 4 CCD-Linienkameras werden gleichzeitig Höhenabweichung, Seitenabweichung und Spurweite eines Radsatzes in einer Taktzeit von 5 s gemessen. Die Meßunsicherheit beträgt 0,03 mm. Ökonomische Effekte sind die Objektivierung des Prüfvorganges und eine Steigerung der Arbeitsproduktivität auf 300 Prozent.

Die ständige Erhöhung der Auflösung von CCD-Liniensensoren läßt Meßunsicherheiten im Mikrometer- und Submikrometerbereich bei gleichen oder kürzeren Taktzeiten erwarten.

Zusammenfassung

Im Beitrag werden Stand der Technik, Struktur und Aufbau von CCD-Linienkameras beschrieben.

Meßverfahren zur berührungslosen Längenmessung werden klassifiziert und die wichtigsten Maßnahmen zur Verringerung der Meßunsicherheit berührungsloser CCD-Längenmeßverfahren mitgeteilt.

An der *TH Ilmenau* entwickelte Gerätesysteme zur berührungslosen Längenmessung mit CCD-Linienkameras werden vorgestellt.

Die Einsatzerfahrungen und der ökonomische Nutzen ausgewählter industrieller Applikationsbeispiele belegen vor allem die verbesserte Meßökonomie.

Literatur

[1] Hofmann, D., u. a.: Rechnergestützte Qualitätssicherung — CAQ. BC — KC — MC — PC Applikationen, Listings. Kammer der Technik Berlin, WGMA, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Sektion Technologie für den wissenschaftlichen Gerätebau, 1988.

[2] Merbach, P.: Untersuchungen über die Realisierungsmöglichkeiten des berührungslosen Antastens bei automatisierten Dreikoordinaten-Längenmeßeinrichtungen. Dissertation A, TH Ilmenau, 1986.

[3] Hofmann, D.: Handbuch Meßtechnik und Qualitätssicherung. 3. Auflage Berlin: VEB Verlag Technik 1986.

[4] Autorenkollektiv: CCD-Bildsensortechnik. Kammer der Technik, Bezirksverband Suhl, 1985.

[5] Christoph, R.; Endter, R.; Gaida, K.-H.; Schulze, H.: Optoelektronische Sensoren für präzisionsmeßtechnische und medizindiagnostische Geräte. Internationales Messesymposium CAQ '88, Leipzig 17. bis 19. März 1988. Preprints Band 2.

[6] Hofmann, D.: CAQ — Stand und Entwicklungsrendenzen einer neuen Strategie zur industriellen Qualitätssicherung. Leipzig: Internationales Messesymposium CAQ '88, Leipzig 17. bis 19. März 1988. Preprins Band 1.

[7] CCD-Bilderkennungssystem BES 1000. Firmenschrift VEB Studiotechnik Berlin 1985.

[8] Brückner, P.; Hecht, S.; Bastick, M.: CCD-Gerätetechnik aus dem Technikum Suhl. Feingerätetechnik, Berlin 37 (1988) 5, S. 227—228.

[9] Brückner, P.; Linss, G.; Sichardt, A.; Nopper, C.-B.; Gebhardt, K.: Verfahren zur optoelektronischen Messung von zwischen Spitzen aufgenommenen Meßobjekten. Wirtschaftspatent WP G 01 B 3070014.

[10] Jobs, G.: Ein Beitrag zur Verringerung der Meßunsicherheit von optoelektronischen Längenmeßsystemen auf der Basis linearer Photoarrays. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1985.

[11] Woschni, H.-G.; Reinsch, A.; Christoph, R.: Verfahren zur Lagebestimmung einer optisch wirksamen Struktur mit einer CCD-Zeile. Feingerätetechnik, Berlin 33 (1984) 5, S. 219—222.

[12] Blanck, G.: Steuersystem für modulare Antriebe. Tagungsband, KDT-Fachtagung „Rechnergestützte Antriebe", Suhl, 1985, S. 27—31.

msr 8901

M. T. Pham, W. Hoffmann, J. Hüller, H. Langenhagen, J. Schöneich

Feldeffekttransistor als chemischer Sensor

0. Einleitung

Die wichtigsten Trends bei der Entwicklung neuer chemischer Sensoren sind

- Integration zu Multifunktionssensoren einschließlich Verarbeitungs- und Auswerteelektronik
- Realisierung von Mikrosensoren, deren Geometrien flexibel an verschiedene Meßaufgaben angepaßt werden können
- produktive Technologien zur kostengünstigen Herstellung von Sensoren für den Masseneinsatz.

Ein Weg, der zu den genannten Zielen zu führen verspricht, sind chemisch sensitive Feldeffekttransistoren, deren Entwicklung gegenwärtig weltweit vorangetrieben wird. Erstmalig wurde 1970 das FET-Prinzip zur Messung der chemischen Konzentration in Lösungen [1] — ionensensitiver Feldeffekttransistor (ISFET) — und 1975 in Gasen [2] — Gas-FET — beschrieben. Dieses Prinzip wird heute verstärkt zur Konstruktion von Biosensoren [3] und [4] und auch von Feuchtesensoren untersucht [5]. Im Vergleich zu Transistoren zeigte sich das Diodenprinzip [6] für chemische Sensoren weitaus weniger effektiv.

In verschiedenen Laboratorien wurden für einige Sensortypen Muster mit anwendungsreifen Charakteristiken erreicht [7] bis [10]. Erste Sensormuster aus Vorproduktionsserien sind für H^+, K^+, Na^+, NH_3 bekannt geworden [11] und [12]. Diese Übersicht befaßt sich mit ISFET. Weitere Informationen bezüglich dieser Problematik sind in [5] [7] [13] bis [21] zu finden.

1. Funktionsprinzip

Der ISFET (Bild 1) hat im Vergleich zum MISFET (Metal-Insulator-Semiconductor) anstelle der Metallgateelektrode eine Referenzelektrode (RE) und eine auf dem Gateisolator befindliche ionensensitive Membran (ISM). Beide stehen in direktem Kontakt mit dem zu messenden Elektrolyt. Als Meßeffekt wird die Variation des Drainstromes I_D in Abhängigkeit von der Konzentration einer spezifischen Ionenart im Elektrolyten genutzt.

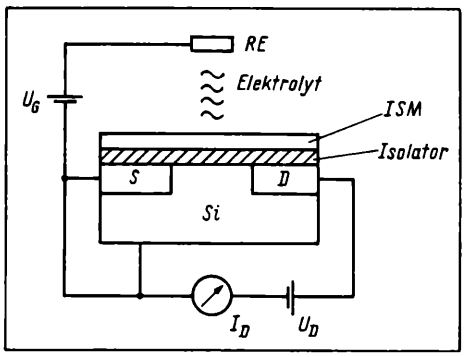


Bild 1. Schematischer Aufbau des ISFET
U_G Gatespannung; U_D Drainspannung; I_D Drainstrom; *RE* Referenzelektrode; *ISM* ionenselektive Membran; *S* Source; *D* Drain; *Si* Silizium

Im Nichtsättigungsbereich gilt für den Drainstrom bei n-Kanal-Transistoren

$$I_D = \frac{\mu \varepsilon b}{dL}\left(U_{GS} - U_t - \frac{1}{2}U_{DS}\right)U_{DS}\,. \tag{1}$$

μ Beweglichkeit der Elektronen im Kanal; ε Dielektrizitätskonstante des Gateisolators; d Schichtdicke des Gateisolators; b, L Breite bzw. Länge des Kanals; U_{GS} Gatespannung; U_{DS} Drainspannung

Durch die Anwesenheit von RE, ISM und Elektrolyt wird die Schwellspannung U_t modifiziert [22] zu

$$U_t = -\psi_0 + E_{ref} + \chi_{sol} - \frac{1}{q}\Phi_{Si} + 2\varphi_F - \frac{Q_B + Q_{SS} + Q_i}{C_i}\,. \tag{2}$$

E_{ref} Referenzelektrodenpotential gegenüber Vakuum; χ_{sol} Oberflächendipolpotential des Elektrolyts; Φ_{Si} Elektronenaustrittsarbeit von Si; Q_B Verarmungsladung im Si; Q_{SS} Ladung der Grenzflächenzustände des Si; Q_i Ladung im Isolator; φ_F Fermipotential gegenüber Eigenleitungsniveau; C_i Kapazität der Isolatorschicht; q Elementarladung

Im Betrieb des ISFET sind bis auf ψ_0 alle Parameter in (2) konstant. ψ_0 ist die Potentialdifferenz an der Phasengrenze ISM/Elektrolyt und abhängig von der Konzentration der für die ISM spezifischen Ionen im Elektrolyt und bestimmt die Ionensensitivität des Sensors. Die Konzentrationsabhängigkeit des ψ_0 wird durch die ISM bestimmt. Für ISM vom Ionenaustauschertyp gilt die Nernstsche Gleichung

$$\psi_0 = \text{konst.} + \frac{RT}{Z_i F}\cdot \ln\left(a_i + K_{ij}a_j\right). \tag{3}$$

Z_i Ladungsänderung der Meßionen; F Faraday-Konstante; R Gaskonstante; T absolute Temperatur; a_i Aktivität der Meßionen; a_j Aktivität der Störionen; K_{ij} Selektivitätskoeffizient; $a = f \cdot c$ (f Aktivitätskoeffizient; c Ionenkonzentration)

Membranen aus anorganischen Isolatoren, wie Si_3N_4, Al_2O_3, Ta_2O_5 sind pH-sensitiv. Die pH-Abhängigkeit von ψ_0 beruht auf Oberflächendissoziationsreaktionen und wird mit Hilfe der Site-Binding-Theorie [23] und [24] beschrieben

$$\psi_0 = 2{,}3\frac{kT}{q}\cdot\frac{\beta}{\beta+1}\cdot\left(pH_{pzc} - pH\right). \tag{4}$$

k Boltzmannkonstante; q Elementarladung; β Parameter der Oberflächenreaktivität; pH_{pzc} pH beim Nulladungspotential der Oberfläche

2. Sensorstruktur

Dominierend sind planare Chipstrukturen (Bild 2). Alle elektrischen Kontakte und die ISM befinden sich auf einer Chipseite. Zur Verzögerung des Lecks durch den Elektrolyt haben S und D verlängerte

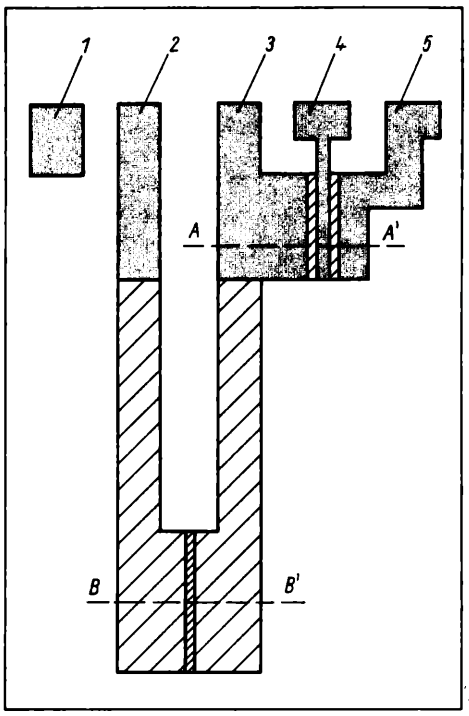
Dr. sc. nat. PHAM MINH TAN (48) absolvierte bis 1966 ein Studium der physikalischen und Elektrochemie an der TU Dresden. 1972 Promotion A, 1980 Promotion B. Seit 1970 wissenschaftlicher Mitarbeiter der AdW der DDR in Rossendorf am Zentralinstitut für Kernforschung.

Dr. rer. nat. WERNER HOFFMANN (43) studierte Chemie an der TU Dresden und promovierte dort am Wissenschaftsbereich Fotophysik. 1972 bis 1976 Entwicklungsingenieur im VEB Carl Zeiss JENA und seit 1977 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Zentralinstitut für Kernforschung der AdW der DDR in Rossendorf.

Dr. rer. nat. JÜRGEN HÜLLER (47) studierte von 1960 bis 1965 Chemie an der TU Dresden und promovierte 1979 an der AdW der DDR mit einem Thema zur Halbleiter-Elektrochemie. Seit 1968 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Zentralinstitut für Kernforschung der AdW der DDR in Rossendorf. Arbeitsgebiet: Charakterisierung ionenimplantierter Schichten.

Dipl.-Ing. HANS LANGENHAGEN (48) absolvierte 1960 die Ingenieurschule für Elektrotechnik Mittweida im Fachgebiet Strahlungsmeßtechnik und studierte bis 1974 Technische Kybernetik an der TU Dresden. Seit 1960 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Zentralinstitut für Kernforschung der AdW der DDR in Rossendorf. Gegenwärtiges Arbeitsgebiet: Meßtechnik kleiner Ströme und Spannungen sowie Meßwerterfassung.

Dr. rer. nat. JOACHIM SCHÖNEICH (53) studierte am Polytechnischen Institut in Leningrad experimentelle Kernphysik und ist seit 1963 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Zentralinstitut für Kernforschung der AdW der DDR in Rossendorf. 1978 Promotion A an der TU Dresden. Gegenwärtiges Arbeitsgebiet: Ionenimplantationstechnik.



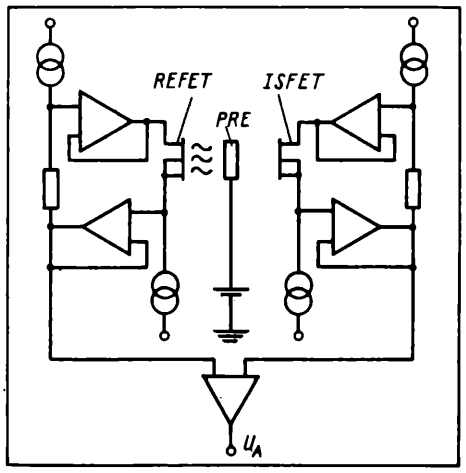


Bild 3. Prinzip der Differenzmessung mit ISFET-MISFET
PRE Pseudoreferenzelektrode

Bild 2. Struktur ISFET und MIS [10]
Chipgröße 1,4 × 1,9 mm²; Gatefläche 20 × 400 µm²; Kontakte: *1* Substrat, *2* ISFET-Drain, *3* gemeinsames Source, *4* Gate, *5* MIS-Drain

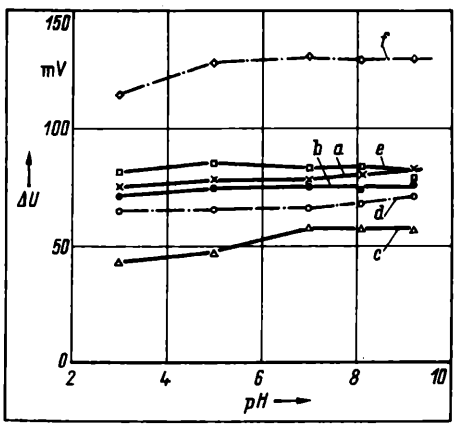


Bild 4. Beeinflussung der pH-Sensitivität der SiO_2-Oberfläche durch Ionenimplantation von Ga (40 keV) und Na (20 keV) mit anschließender Behandlung bei 1000 °C und 100 s
Dosis der Ionenimplantation (Ionen/cm²):
a $3 \cdot 10^{16}$ Ga + $1 \cdot 10^{16}$ Na; *b* $3 \cdot 10^{16}$ Ga + $3 \cdot 10^{16}$ Na; *c* $3 \cdot 10^{16}$ Ga + $6 \cdot 10^{16}$ Na; *d* $5 \cdot 10^{16}$ Ga + $1 \cdot 10^{16}$ Na; *e* $5 \cdot 10^{16}$ Ga + $3 \cdot 10^{16}$ Na; *f* $5 \cdot 10^{16}$ Ga + $6 \cdot 10^{16}$ Na

Leitbahnen zu den Bondinseln. Technologisch unüblich ist die Verlagerung der elektrischen Kontakte auf die der ISM gegenüberliegenden Chipseite. Der Zugang zu *S* und *D* erfolgt vertikal durch die Chipebene hindurch und mit Hilfe der Thermomigration oder der selektiven Rückseitenätzung.

Für Sondereinsätze konzipiert sind Nadel-ISFET (Nadelspitze bis herab zu 10 µm Durchmesser) [19] und Durchflußzellen-ISFET [25] (ISFET bildet die Innenwandung eines Pyramidenschnittes aus Si mit Bodenflächen von 1,2 × 1,2 mm² und 0,6 × 0,6 mm² und Höhe von 0,39 mm). Für diese Konstruktion ist die anisotrope Ätzung erforderlich.

Der ISFET als diskrete Struktur (Eintransistor-ISFET) arbeitet nicht stabil. Als Grundeinheit ist die Dualstruktur heute üblich, die aus 1 ISFET und 1 MISFET oder aus 2 ISFET bestehen kann [7] und [8]. Sie gestattet in Differenzmeßschaltungen Störeffekte, wie Licht, Temperatur und Drift, zu reduzieren und wird als MNOS (metal-nitride-oxide-semiconductor) oder CMOS (complementary-metal-oxide-semiconductor) [9] realisiert.

Die integrierten Strukturen rücken heute verstärkt ins Blickfeld der ISFET-Forschung. Schwerpunkte sind dabei

- Integration mehrerer ISFET auf einen Chip: monofunktionell und multifunktionell
- Kombination von ISFET mit pH-Aktoren für die Kalibrierung und für den Einsatz bei Biosensoren [26]
- Mikroreferenzelektroden [7]
- elektronische Komponenten und Schaltungen für die Kompensation der Störeffekte und für die Signalverarbeitung. Realisiert wurden bereits ein analoger integrierter ISFET-Schaltkreis als Spannungsfolger mit ISFET-MISFET-Differenzeingangsstufe [8].
  Ein ISFET-Sensor mit integriertem Temperatursensor zur Messung und Kompensation der Temperatur wurde demonstriert [10].

Eine Besonderheit im Herstellungsprozeß von ISFET ist die Verkapselung, d. h. das hermetische Verschließen des gesamten Sensorchips mit Freilassung des Gategebiets. An diesem Problem wird gegenwärtig intensiv gearbeitet, wobei bereits einige Verfahren für die Massenproduktion vorgeschlagen wurden [14].

3. Referenzelektrode

Spezielle Referenzelektroden für ISFET sind derzeit in Entwicklung. Ziel ist die Miniaturisierung und Integration. Zwei wichtige Lösungsvarianten sind:

- Miniaturisierung der Ag/AgCl-Elektrode. In Meßmedien mit konstanter Konzentration an Cl^--Ionen ist diese RE direkt einsetzbar. In anderen Fällen ist die Anwendung nur in Verbindung mit einer Elektrolytbrücke möglich. Labormuster von Mikro-RE, bei denen Ag/AgCl-Elektrode und Elektrolytbrücke auf einem Si-Chip integriert sind, wurden vorgestellt.
- RE nach dem FET-Prinzip, RE-FET genannt (Bild 3). Das Prinzip beruht auf der Messung der Signaldifferenz zweier ISFET unterschiedlicher Sensivität. Als RE-FET gilt der ISFET mit geringerer Sensitivität. Beispiele für die Realisierung und Schaffung von Membranen für diesen Zweck wurden in [7] und [10] beschrieben (Bild 4).

4. Ionenselektive Membranmaterialien für ISFET

Die bekannten ionenselektiven Membranenmaterialien, die bei konventionellen ionenselektiven Elektroden verwendet werden, lassen

Tafel. Untersuchte Membranmaterialien für ISFET [4] [7] [10] [13] [14] [17] [19] [27] bis [31]

ISFET	Material
pH	Si_3N_4 SiO_xN_y Al_2O_3 Ta_2O_5 ZrO_2 Metallalkoholat Glas Bornitrid
Na^+	Aluminosilikat Polymer ionenimplantierte Isolatoren
K^+	Polymer ionenimplantierte Isolatoren
NH_4^+	Polymer
Ca^{++}	Polymer
Halogenide	Silberhalogenid
CN^-	Silberhalogenid/-sulfid
NO_3^-	Polymer
F^-	LaF_3, polykristallin F^--gedriftes SiO_2
ISFET-Biosensoren	biochemisch aktive Materialien

sich prinzipiell auch für ISFET einsetzen. Hinzu kommt eine weitere Materialgruppe, deren Verwendung als ISM erst mit diesem neuen Sensortyp möglich wurde: Isolatoren. Typische Beispiele dafür sind Si_3N_4, Al_2O_3 und Ta_2O_5 als pH-Membran und Parylene als ionenindifferente Membran. Die Tafel gibt eine Übersicht.
Relevante Aspekte hinsichtlich ISM für ISFET sind:

- Haftung auf dem Gateisolator
  Sie beeinflußt maßgeblich die Stabilität der chemischen Empfindlichkeit.
- kleine Abmessungen: Fläche $< 0{,}1\ mm^2$, Schichtdicke $< 100\ nm$
  Bei Membranen für Dualstrukturen werden Schichtdicken von Monolagen gefordert [7], um eine hohe Gleichtaktunterdrückung bei Differenzmessungen zu gewährleisten.
- Erzeugung von unterschiedlichen Membranmaterialien auf einem Chip ist erforderlich für die Realisierung von Multifunktionssensoren.
- Die Technologie muß produktiv und kompatibel zur Transistorherstellung sein.

ISFET-spezifische Neuentwicklungen bezüglich der ISM sind die chemisch modifizierte Oberflächen mit Hilfe der Kovalenzbindungsmethode [7] [20] und [21] und der Ionenimplentation [27] bis [30].
Bei der Kovalenzbindungsmethode wird das ISM-Material über einen Vermittler (Silanisierungsmittel) chemisch an die Gateisolatoroberfläche gebunden. Sie eignet sich für organische Materialien. Mit Hilfe der Ionenimplantation wird durch Ionenbeschuß die Oberfläche des Gateisolators in ihrer chemischen Zusammensetzung modifiziert. Diese Methode ist für anorganische Materialien geeignet (Bild 5).

5. Charakteristiken

Die Umwandlung des chemischen Signals in ein elektrisches erfolgt an der Phasengrenze ISM/Elektrolyt. Das Signal je Dekade der Konzentrationsänderung, die chemische Sensitivität, beträgt bei 25 °C entsprechend (3) maximal

$$d\psi_0/d\lg a = 59{,}16\ mV$$

und nach (4)

$$d\psi_0/dpH = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot 59{,}16\ mV \leqq 59{,}16\ mV\ .$$

Experimentelle Werte von ISFET liegen im Bereich 40 ... 58 mV und sind vom Mambranmaterial und dessen Präparationsbedingungen abhängig. Zur Verfügung steht somit ein Signal von 1,65 bis 2,4 mV bei einer Konzentrationsänderung um 10% und von 0,17 ... 0,25 mV bei einer Konzentrationsänderung um 1%.
Die Größen K_{ij} in (3) charakterisieren den Einfluß der Störionen im Meßmedium (chemische Selektivität) und berücksichtigen, daß die ISM in bestimmtem Umfang auch auf die Störionen ansprechen. Wie aus (3) hervorgeht, wird der Störeffekt um so kleiner, je kleiner K_{ij} ist. Für pH-ISFET mit Membranen aus Si_3N_4, Al_2O_3 und Ta_2O_5 beträgt der K-Wert etwa 10^{-6} ... 10^{-9} [10] und [44] gegenüber Alkaliionen, d. h., der Störeffekt ist vernachlässigbar. Für andere Membranmaterialien gelten wie bei den ionenselektiven Elektroden die bekannten Angaben und Gesichtspunkte.

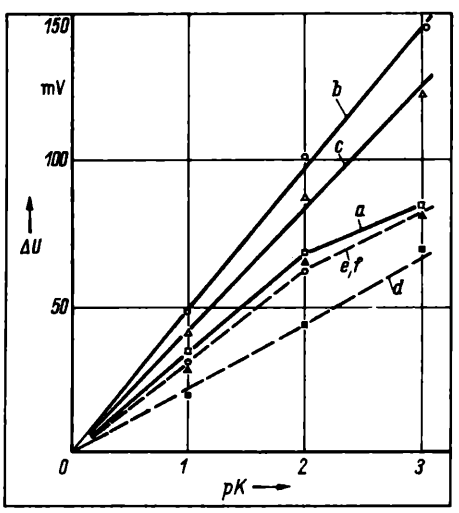


Bild 5. K^+-Sensitivität der SiO_2-Oberfläche nach der Ionenimplantation
Dosis der Ionenimplantation (Ionen/cm^2): $1 \cdot 10^{16}$ Al + $6 \cdot 10^{16}$ B
a + $1 \cdot 10^{16}$ K,
b + $5 \cdot 10^{16}$ K,
c + $1 \cdot 10^{17}$ K;
f, *e* und *d* gemessen bei 0,1 m Na^+, Energie der Implantation Al, B, K: 20, 20, 30 keV

Für Langzeitmessungen mit hoher Genauigkeitsforderung ist die Signaldrift von Bedeutung. Nach einer Einlaufphase stellt sich eine stationäre Drift ein, die für kurze Dauer einen nahezu linearen Verlauf aufweist, so daß sie in mV/h angegeben werden kann. Die Drift ist u. a. vom Membranmaterial abhängig. Bei SiO_2 wurde die vergrabene Struktur von OH-Gruppen [32] und bei Si_3N_4 die allmähliche Umwandlung in Oxid [33] als Ursache für die Drift interpretiert. Al_2O_3 und Ta_2O_5 sind stabiler. Die Methode der alternierenden Kalibrierung im Wechsel mit der Messung [34] und die Methode der externen Korrektur [9] wurden zur Eliminierung der Drift angewendet. Je nach Anwendungszweck sind Si_3N_4, Al_2O_3 und Ta_2O_5 als ISM für pH-Sensoren geeignet.
Wegen der kleinen Abmessung und der direkten Impedanzwandlung spricht der ISFET schnell an. Die Ansprechzeit auf ein elektrisches Signal wurde im Bereich von µs ermittelt. Der Ionentransport zwischen dem Elektrolyt und der ISM ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt für das chemische Ansprechen. Typische Werte für die Ansprechzeit liegen im Bereich von einigen 10 bis 100 ms. In Meßmedien, die zur Verkrustung der Membranoberfläche neigen, besteht wie bei den konventionellen ionenselektiven Elektroden die Gefahr einer langen Ansprechzeit.
Es liegen noch keine einheitlichen und genügenden Daten über die ISFET-Lebensdauer vor, da die bisher verfügbaren Labormuster mit manueller Verkapselung hergestellt wurden. Wesentliche Faktoren, die die ISFET-Lebensdauer beeinflussen, sind:

- Auslaugung der elektrochemisch aktiven Komponenten aus der ISM
- Verschiebung der Transistorkennlinien durch hohe Spannungen
- Haftung der ISM am Gateisolator
- Leck der Verkapselung.

Es wurde nachgewiesen, daß für pH-ISFET eine Lebensdauer von etwa 1 Jahr prinzipiell möglich ist. Eigene Untersuchungen an pH-ISFET mit Si_3N_4-Membran und Epoxidharzverkapselung demonstrierten die Funktionstüchtigkeit bei ununterbrochenem Betrieb von 6 Monaten [28].
Der Temperaturkoeffizient (TK) des Sensorsystems (ISFET + RE + Elektrolyt) ist beträchtlich und liegt für die diskrete Struktur im Bereich von 1 ... 10 mV/K (≙0,02 ... 0,2 pH/K) und hängt auch vom pH-Wert ab. Wenn eine Meßgenauigkeit von ±0,01 pH für eine Temperaturschwankung von ±1 °C gefordert wird, muß der TK demnach kleiner 0,5 mV/K sein. Die praktischen Meßaufgaben haben meistens einen engen Temperaturschwankungsbereich, so daß eine wirksame Temperaturkompensation möglich ist. Verschiedene Methoden werden für diesen Zweck eingesetzt:

- Messung am Isothermenschnittpunkt
- Differenzmessung mit der Dualstruktur ISFET-MISFET
- rechnerische Korrektur
- Kompensationsschaltung (extern oder integriert).

Mit der Dualstruktur allein kann der Temperatureffekt nicht völlig beseitigt werden, da die Beiträge der RE, des Elektrolyten und die pH-Abhängigkeit der Schwellspannung U_t nicht erfaßt werden. Aussichtsreich ist die Kombination der Dualstruktur mit einer Kompensationsschaltung unter Verwendung eines Temperatursensors [10].
Einen weiteren Störeffekt stellt der Lichteinfluß dar. Die direkte Raumbeleuchtung verursacht bei Dualstrukturen eine Ausgangssignalverschiebung um 1 ... 3 mV (≙3 ... 6% *pH*) im Vergleich zu 20 ... 30 mV bei diskreten Strukturen (bezogen auf Meßwerte im Dunkeln) [8] und [10]. Bei praktischen Meßaufgaben ist der Lichteffekt in lichtundurchlässigen Medien vernachlässigbar oder kann durch Maßnahmen vernachlässigbar klein gehalten werden. Besondere Chipkonstruktionen wurden zur Reduzierung des Lichteinflusses beschrieben, bei denen lichtempfindliche Gebiete mit lichtundurchlässigen Materialien abgedeckt werden.

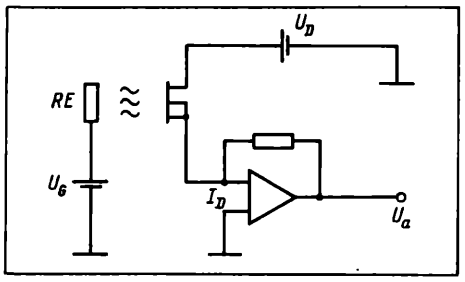


Bild 6. Prinzip der Messung bei konstanter Gatespannung

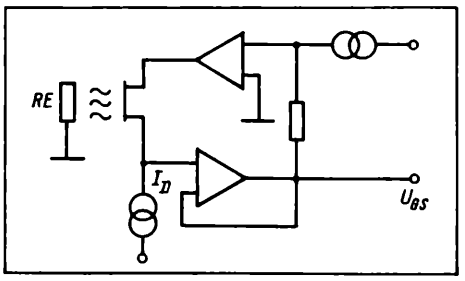


Bild 7. Prinzip der Messung bei konstantem Drainstrom

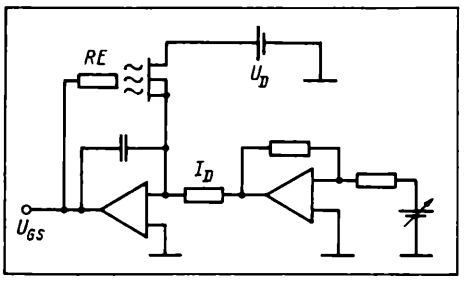


Bild 8. Prinzip der Messung bei konstantem Drainstrom mit Rückkopplung

ISFET haben meistens folgende typische Kenndaten: $U_D = 0 \ldots 1$ V, $U_{GS} = -2 \ldots +2$ V, $I_D = 10 \ldots 500$ µA, $dI_D/dU_{GS} = 100$ bis 300 µA/V.

6. Meßschaltungen

Die Meßschaltungen basieren auf 2 Prinzipien:

— I_D wird bei Konstanthaltung von U_{GS} gemessen (Bild 6).
Die Veränderung des Arbeitspunktes des Transistors mit der Konzentrationsvariation während der Messung wirkt sich nachteilig auf den Temperatureffekt und die Linearität des Ausgangssignals aus.

— Wichtiger für die praktische Anwendung ist die Messung von U_{GS} bei Konstanthaltung von I_D (Bild 7).
Das Meßergebnis liefert direkt die Änderung des konzentrationsabhängigen Phasengrenzpotentials wie bei der traditionellen Methode der ionenselektiven Elektroden. Bevorzugt wird mit Hilfe einer Rückkopplungsschaltung die Änderung von U_{GS} für $dI_D = 0$ kompensiert (Bild 8). Damit befindet sich der Transistor ständig in einem festen Arbeitspunkt, $dU_{GS} = dI_D = 0$.
Für ISFET auf der Basis von Dualstrukturen wird die Differenzschaltung nach dem Vorbild von Operationsverstärkern angewendet (Bild 9). Durch die Rückkopplung zum MISFET-Eingang ergibt sich insgesamt ein „Konzentrationsfolger" (Bild 10).

7. Applikation

Die Untersuchungen bezüglich praktischer Anwendungen von ISFET befassen sich mit der Verbesserung bei traditionellen Meßaufgaben und der Erschließung von neuen Anwendungen. ISFET-spezifische Vorteile (kleine Abmessung, flexible Geometrie, Robustheit, niederohmiges Ausgangssignal, Multifunktion, kurze Ansprechzeit) werden für kontinuierliche Messungen in Objekten kleinster Volumina und bei der Prozeßsteuerung und -kontrolle genutzt. Dominierend sind Anwendungsuntersuchungen auf den Gebieten Humanmedizin, Umweltschutz, chemische und biochemische Analytik [7] [9] [13] [14] [25] [27] und [28] (Bild 11).
Als Beispiel für die Auswerteelektronik wurde am Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf ein digitales ISFET-pH-Meter für Messungen mit Sensoren in Dualstruktur ISFET-MISFET entwickelt [35]. Ein On-Chip-Temperatursensor ermöglicht neben der Temperaturkompensation (TK $\leqq$ 0,001 pH/K) auch die Temperaturmessung. Das Gerät wiegt etwa 400 g und wird mit Batterie betrieben.

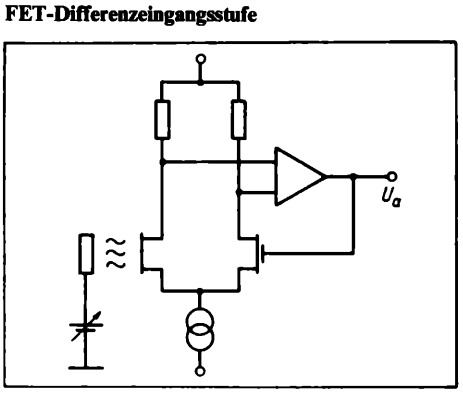
Zusammenfassung

ISFET lassen sich wirtschaftlich herstellen und bieten entscheidende Verbesserungen und Vorteile gegenüber konventionellen chemischen Sensoren sowie potentielle Möglichkeiten zur Realisierung von integrierten Mikrosensoren. Mit ihnen lassen sich nicht nur herkömmliche Meßaufgaben lösen, sondern auch neue Einsatzmöglichkeiten erschließen. Aktuell sind Entwicklungen bezüglich ISFET-spezifischer Membranmaterialien, integrierter Mikroreferenzelektroden und Sensorverkapselung.
Die Nutzung der Möglichkeiten und Mittel der Mikroelektronik und der Halbleitertechnologie für chemische Sensoren steht erst am Anfang. Der erreichte Stand bildet eine solide Grundlage für weitere Entwicklungen.

Literatur

[1] Bergveld, P.: Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements. IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-17 (1970) S. 70ff.
[2] Lundström, I.; Shivaraman, S.; Svensson, C.: A hydrogen-sensitive Pd-gate MOS transistor. J. Appl. Phys. 46 (1975) S. 3876ff.
[3] Janata, J.; Moss, S. D.: Chemically-sensitive field-effect-transistor. Biomed. Eng. (1976) July, S. 241ff.
[4] Morizumi, T.; Miyahara, S.; Shiokawa, S.: Biosensors. Ooyobutsuri 54 (1985) S. 98ff.
[5] Proc. Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Philadelphia, 1985.
[6] Wen, C. C.; Chen, T. C.; Zemel, J. N.: Gate controled diodes for ionic concentration measurement. IEE Proceedings ED-26 (1979) S. 1945ff.
[7] Implantable Sensors for closed-loop Prothetic Systems. Mount Kisco/USA: Futura Publishing Company. Inc. 1985, S. 115ff.
[8] Sibbald, A.: A chemical-sensitive integrated circuit: The operational transducer. Sensors and Actuators 7 (1985) S. 23f.
[9] de Rooij, N. F.; Haemmerli, A.; Grifel, A.: C-MOS compatible pH-ISFET with Al_2O_3 gate. In: [7], S. 139ff.
[10] Pham, M. T.; Hoffmann, W.; Hüller, J.: Integrierter chemischer Sensor. Forschungsberichte ZfK Rossendorf, KFE 1985, 1986, 1987.

Bild 9. Operationsverstärker mit ISFET-MISFET-Differenzeingangsstufe



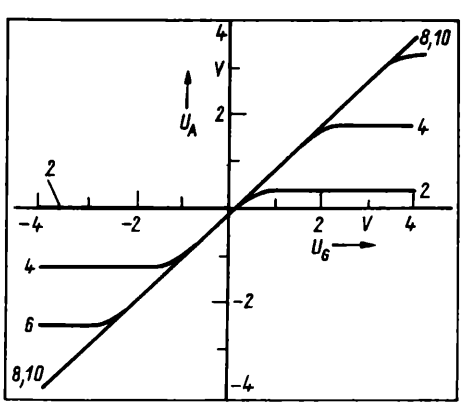
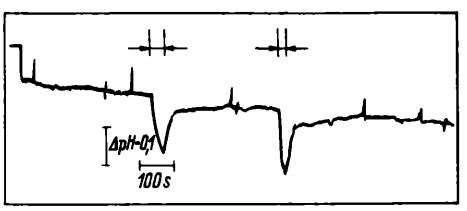


Bild 10. Transfercharakteristik der Dualstruktur mit integriertem Operationsverstärker [10]

Bild 11. Kontinuierliche Registrierung der pH-Änderung im arteriellen Blut eines Hundes bei Beatmungsunterbrechung



[11] Katheter-pH-ISFET der Firma Sentron Cordis Europa N.V. Roden/Holland, 1986.
[12] ISFET für pH, pNa, pK, pNH_3 von Thorn EMI Central Research Laboratories, 1987.
[13] JANATA, J.; HUBER, R. J.: Ion-sensitive field effect transistor. Ion-selective Electrode Rev. 1 (1979) S. 31ff.
[14] SIBBALD, A.: Chemical-sensitive field effect transistors. IEE Proc. I, 130 (1983) S. 233; Recent advances in field-effect chemical microsensors. J. of Molecular Electronics 2 (1986) S. 51ff.
[15] BERGVELD, P.; DE ROOIJ, N. F.: The history of chemically sensitive semiconductor devices. Sensors and Actuators 1 (1981) S. 5ff.
[16] BERGVELD, P.: The operation of an ISFET as an electronic device. Sensors and Actuators 1 (1981) S. 17ff.
[17] MATSUO, T.; ESASHI, M.: Methods of ISFET fabrication. Sensors and Actuators 1 (1981) S. 77ff.
[18] FUNG, C. D.; CHUNG, P. W.; KO, W. H.: A generalized theory of an electrolyte-insulator-semiconductor field-effect transistor. IEE Trans. Electron Devices ED-33 (1986) S. 8ff.
[19] SEIYAMA, T.; FUEKI, K.; SHIOKAWA, J.; SUZUKI, S. (Eds.): Chemical Sensors. Proc. of Int. Meeting on Chemical Sensors, Fukuoka/Japan, 1983, S. 473ff.
[20] Proc. of the 2nd Int. meeting on chemical sensors. Bordeaux 1986.
[21] Transducers '87. Proc. of the 4th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Tokyo 1987.
[22] BOUSSE, L.: Single electrode potentials related to flat-band voltage measurements on EOS and MOS structures. J. Chem. Phys. 76 (1982) S. 5128ff.
[23] BOUSSE, L.: Operation of chemically sensitive field-effect sensors as a function of the insulator-electrolyte interface. IEEE Trans. Electron Devices ED-30 (1983) S. 1263ff.
[24] YATES, D. E.; LEVINE, S.; HEALY, T. W.: Site-binding model of the electrical double layer at the oxide/water interface. J. Chem. Soc. Faraday Trans. 70 (1974) S. 1807ff.
[25] SIBBALD, A.; SHAW, J. E. A: A flow-through ion-selective field effect transistor. Sensors and Actuators 12 (1987) S. 297ff.
[26] VAN DER SCHOOT, B. H.; BERGVELD, P.: The pH-static enzyme sensor. Analytica Chimica Acta 199 (1987) S. 157ff.
[27] HOFFMANN, W.; HÜLLER, J.; PHAM, M. T.: Continuous measurement of pH and alkali ion activity in biomedical experiments. In: Proc. of the 1st Bioelectroanalytical Symposium, Matrafüred, 1986. Budapest: Akademiai Kiado 1986.
[28] HOFFMANN, W.; Hüller, J.; PHAM, M. T.; SCHÖNEICH, J.: Ionenimplantation für ISFET's. 3. Fachtagung Mikroelektronik-Technologie-Applikation, Karl-Marx-Stadt, Oktober 1987.
[29] SANADA, Y.; AKIYAMA, T.; UJISHIRA, Y.; NIKI, E.: Preparation of Na-selective electrodes by ion-implantation of lithium and silicon into single-crystal alumina wafer and its application to the production of ISFET's. Fresenius Z. Anal. Chem. 312 (1982) S. 526ff.
[30] PHAM, M. T.; HOFFMANN, W.: Ion-sensitive membranes fabricated by the ion-beam technique. Sensors and Actuators 5 (1984) S. 217ff.
[31] MORITZ, W.: Chemische Halbleitersensoren. Forschungsbericht, Humboldt-Universität, Berlin 1987.
[32] BOUSSE, L.; BERGVELD, P.: The role of buried OH sites in the response mechanism of inorganic-gate pH-sensitive ISFET's. Sensors and Actuators 6 (1985) S. 65ff.
[33] HARAME, D. L.; BOUSSE, L.; MEINDL, D. J.: Ion-sensitive devices with Si_3N_4 and Borosilicate glass insulators. IEEE Trans on Electron Devices ED-34 (1987) S. 1700ff.
[34] SIBBALD, A.; WHALLEY, P. D.; COVINGTON, A. K.: A miniature flow-through cell with the four-function Chem-FET integrated circuit for simultaneous measurement of K, H, Ca, Na. Anal. Chim. Acta 159 (1984) S. 47ff.
[35] LANGENHAGEN, H.: Laborbericht Nr. 497/87, Zentralinstitut für Kernforschung der AdW der DDR Rossendorf, Bereich W. msr 8879

T. Elbel, J. E. Müller

Thermoelektrische Sensoren zur berührungslosen Temperaturmessung

0. Einleitung

Die Temperatur ist eine der wichtigsten Meßgrößen, weil sehr viele physikalische, chemische und auch biologische Effekte temperaturabhängig sind. Erst die Anwendung angepaßter Temperatursensoren, die die erforderlichen elektrischen Signale bereitstellen, ermöglicht einen Einsatz mikroelektronischer Technik zur effektiven Steuerung und Regelung temperaturabhängiger Prozesse. Trendanalysen zeigen, daß für den Einsatz von Temperatursensoren mit einer jährlichen Steigerungsrate von über 20% zu rechnen ist, wobei für berührungslos arbeitende Temperatursensoren ein besonders stark steigender Bedarf erwartet wird.

Zur berührungslosen Temperaturmessung werden vorrangig thermische Strahlungsempfänger, vor allem pyroelektrische Detektoren und Strahlungsthermosäulen, eingesetzt. Pyroelektrische Detektoren haben ein hohes Entwicklungsniveau erreicht. Sie gestatten jedoch nur den Nachweis von Impulsstrahlung oder modulierter Strahlung. Soll kontinuierliche Strahlung registriert werden, ist ein Zerhacker erforderlich. Es ist vorteilhaft, wenn pyrometrische Meßanordnungen ohne bewegte mechanische Teile aufgebaut werden können. Zu diesem Zweck wurde eine miniaturisierte Dünnschichtthermosäule entwickelt.

1. Grundlagen

Wenn die Verbindungsstelle zweier Leiter oder Halbleiter mit unterschiedlichen thermoelektrischen Potentialen erwärmt wird, entsteht aufgrund des Seebeck-Effektes eine Spannung. Dieser Effekt wird seit langem zur berührenden Temperaturmessung genutzt. Bei einem Strahlungsthermoelement verursacht die vom Empfänger absorbierte Infrarot- (oder UV- bzw. sichtbare) Strahlung einen Temperaturanstieg an der Verbindungsstelle. Wenn die die Strahlung absorbierende Sensorfläche aus einer Vielzahl in Reihe geschalteter Thermoelemente besteht, dann bezeichnet man einen solchen Sensor als Strahlungsthermosäule. Zur Erreichung einer hohen Empfindlichkeit (Verhältnis der erzeugten Signalspannung zu einfallenden Strahlungsleistung in V/W) sollten die aktiven Detektorelemente massearm und der Wärmeaustausch zwischen diesen und ihrer Umgebung minimal sein. Daher sind empfindliche Strahlungsthermosäulen im allgemeinen folgendermaßen aufgebaut:

Die thermoelektrisch aktive Materialpaarung mit möglichst hoher Thermokraft ist als Dünnschichtsystem realisiert. Gegenwärtig werden vor allem Bi-Sb-Kombinationen und Bi-Sb-Te-Se-Mischkristalle verwendet. Die strahlungsempfindlichen („warmen") Kontakte des thermoelektrischen Dünnschichtsystems ordnet man auf einer dünnen freitragend aufgespannten Folie an und schwärzt sie zur besseren

Dr.-Ing. THOMAS ELBEL (43) studierte von 1964 bis 1969 Theoretische Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Ilmenau. Von 1969 bis 1972 erst Laborassistent, dann Gruppenleiter im Labor für Elektronenstrahlgeräte des VEB Carl Zeiss JENA. Seit 1973 wissenschaftlicher Mitarbeiter am heutigen Physikalisch-Technischen Institut der AdW in Jena. 1980 bis 1984 außerplanmäßige Aspirantur an der Technischen Hochschule Ilmenau (Fachrichtung Festkörperelektronik). 1985 Dissertation A. Seit 1982 Themenverantwortlicher für die Entwicklung miniaturisierter thermischer Sensoren.

Dipl.-Phys. JÜRGEN E. MÜLLER (48) studierte von 1959 bis 1964 an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena. Seit 1964 wissenschaftlicher Mitarbeiter am heutigen Physikalisch-Technischen Institut der AdW der DDR in Jena. Arbeitsgebiete: Applikation thermischer Infrarotdetektoren und berührungslose Temperaturmeßtechnik.

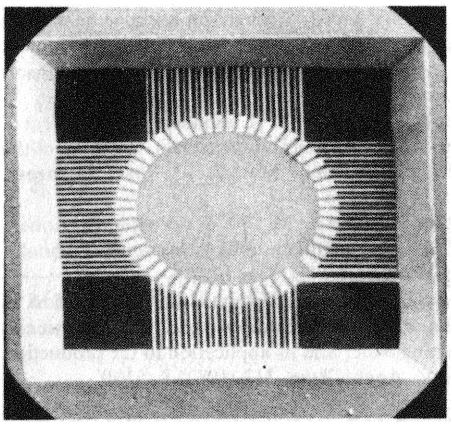


Bild 1. Warme Kontaktstellen einer 50-elementigen Thermosäulenstruktur aufgenommen von unten durch die Substratfolie hindurch (Rasterelektronenmikroskopaufnahme) Der durch das Herausätzen entstandene „Fensterbereich" in der (100)-Si-Scheibe wird von (111)-Ebenen begrenzt (Neigungswinkel 54,7°)

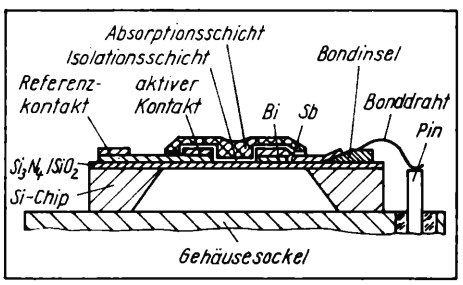


Bild 2. Thermosäulendünnschichtsystem auf anisotrop geätztem Si-Substrat mit Gehäusesockel (schematisch)

Absorption der einfallenden Strahlung. Die („kalten") Referenzkontakte befinden sich auf einem massiven Substrat, das als Wärmesenke wirkt und die Referenzkontakte im wesentlichen auf Umgebungstemperatur hält. Solche Sensoren wurden bisher zumeist als Vakuumthermosäulen ausgelegt, wobei ihr Sensorsystem in einen evakuierten Glaskolben (typische Abmessungen: Durchmesser 20 mm, Länge 80 mm) eingebaut worden ist [1].

Die wichtigsten Detektorkenngrößen sind die Empfindlichkeit S, die spezifische Detektivität D^* und die Zeitkonstante τ. Die Empfindlichkeit einer ideal absorbierenden Thermosäule aus identischen Thermoelementen wird von der Thermokraft α des Thermopaares und dem thermischen Leitwert G eines einzelnen Elementes bestimmt:

$$S = \alpha/G\,, \tag{1}$$

wobei für den Wärmeleitwert Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion berücksichtigt werden müssen. Für die spezifische Detektivität gilt die zugeschnittene Größengleichung:

$$D^* = 7{,}8 \cdot 10^9 \cdot S \cdot (A/R)^{1/2} \qquad \text{in cm Hz}^{1/2}\,\text{W}^{-1}\,. \tag{2}$$

A Empfängerfläche in cm²; R Sensorwiderstand in Ω

Dabei wird vorausgesetzt, daß die Strahlungsthermosäule nur thermisches Rauschen aufweist. Die Zeitkonstante τ wird aus der Wärmekapazität C und dem thermischen Leitwert bestimmt:

$$\tau = C/G\,. \tag{3}$$

2. Aufbau miniaturisierter Strahlungsthermosäulen

Das Entwicklungsziel bestand in einer im Vergleich zu den Vakuumthermosäulen weitgehenden Miniaturisierung bei gleichzeitiger Steigerung der Empfindlichkeit auf wenigstens 50 V/W. Theoretische Abschätzungen zeigten, daß dazu auf einer Empfängerfläche von 1 mm² etwa 50 bis 70 thermoelektrische Kontaktstellen angeordnet werden müssen [2]. Als Verhältnis von Länge zu Breite der Thermoschenkel, die die warmen Kontakte mit den kalten verbinden, erwies sich dabei 27:1 als optimal [3]. Als thermoelektrische Materialpaarung wurde eine $Bi_{0,9}Sb_{0,1}$/Sb-Kombination ausgewählt. Die ins Auge gefaßte Empfängergeometrie konnte nur mit fotolithografischen Verfahren sinnvoll realisiert werden. Im Physikalisch-Technischen Institut der AdW der DDR (PTI) wurden daher Entwicklungsarbeiten zur fotolithografischen Strukturierung des thermoelektrisch aktiven Schichtsystems $Bi_{0,9}Sb_{0,1}$/Sb und der Kontaktierungsschichten durchgeführt und Substrate bezüglich ihrer Eignung für Fotolithografie auf freitragenden Folien untersucht. Bei der Substratauswahl müssen folgende Anforderungen berücksichtigt werden:

- elektrisch isolierend
- kleine Wärmeleitfähigkeit
- dünn, aber trotzdem mechanisch stabil
- chemisch und thermisch stabil.

Von verschiedenen untersuchten organischen und anorganischen Substratfolien entsprechen dünne SiO_2-Folien diesen Anforderungen am besten. Es ist möglich, eine etwa 1 µm dicke SiO_2/Si_3N_4-Schichtkombination freitragend aufgespannt in einem massiven Si-Rahmen zu präparieren. Als Ausgangsmaterial werden CVD-Si_3N_4/SiO_2-beschichtete (100)-Si-Scheiben verwendet, in die von der Scheibenrückseite her durch einen anisotropen Ätzprozeß „Fenster" (Abmessungen etwa 2 mm × 2 mm) geätzt werden [4] (vgl. Bild 1). Die Verwendung von Si-Substraten mit freitragenden „Si_3N_4/SiO_2-Fensterbereichen" ist mit einer Reihe von Vorteilen verbunden:

- Ein Aufkleben der Folien (bei Verwendung organischer Folien üblich) ist nicht mehr notwendig.
- Auf einer Si-Scheibe können eine Vielzahl von Sensorchips hergestellt werden.
- Die Sensorfertigung ist weitgehend zur Mikroelektronik technologiekompatibel und kann deren Einrichtungen und Anlagen nutzen.
- Der Weg für eine Integration weiterer Sensorfunktionen oder von Auswerteelektronik in das Substrat ist geebnet.

Zur fotolithografischen Strukturierung von Bi und Sb sind bisher aus der Literatur nur verschiedene Lift-off-Techniken bekannt geworden [4]. Im PTI gelang es dagegen auch, $Bi_{0,9}Sb_{0,1}$ und Sb ohne Beeinflussung ihrer Thermokraft naßchemisch zu strukturieren [5]. Bild 1 zeigt die „warmen" Verbindungsstellen mit den Thermoschenkeln (Strukturbreite etwa 16 µm). Vor der Beschichtung und Strukturierung der thermoelektrisch aktiven Schichten müssen die Kontaktierungsschichten (Al mit NiCr als haftvermittelnder Schicht) aufgebracht und strukturiert werden. Die Si-Chips werden vereinzelt, auf TO-5-Sockel geklebt und durch Ultraschallbonden kontaktiert. Bild 2 zeigt den prinzipiellen Sensoraufbau in Schnittdarstellung. Im Bild 3 ist der Si-Chip mit der kompletten Thermosäulenstruktur auf dem TO-5-Sockel dargestellt. Nach der elektrischen Kontaktierung werden die Sockel mit Kappen unter ausgewählter Schutzgasatmosphäre verschweißt. In die TO-5-Kappen sind im erforderlichen Spektralbereich strahlungsdurchlässige Fenster hermetisch dicht eingeklebt.

Tafel. Leistungsparameter der Strahlungsthermosäule TS-50.1

Empfängerfläche	mm²	1 (1,13 mm ∅)	
Anzahl der Thermopaare		50	
Widerstand	kΩ	20 ... 35	
Widerstands-TK	‰/K	−2 ... −4	
Rauschspannung	nV/Hz$^{1/2}$	≦25	
Sensortyp		schnell	hochempfindlich
Empfindlichkeit (25 °C)	V/W	20 ... 30	40 ... 60
Empfindlichkeits-TK	‰/K	−3,5 ... −5,5	−4,0 ... −6,5
Zeitkonstante	ms	15 ... 25	45 ... 55
NEP (500 K, DC)	W/Hz$^{1/2}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$
D^* (500 K, DC)	cm Hz$^{1/2}$/W	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$
Spektrale Empfindlichkeit	gleichmäßig vom UV bis zum fernen IR (begrenzt durch Fenstermaterial)		
Fenstermaterial	standardmäßig: KRS-5 andere Materialien nach Spezifikation		
Gesichtsfeldwinkel	117° (KRS-5-Fenster)		
Gehäuse	TO-5 (modifiziert)		
maximal zulässige Umgebungstemperatur	°C	−20 ... 70	
maximale Bestrahlungsstärke	mW/mm²	12	
Gewicht	g	2	

3. Ergebnisse

Die Sensorkonzeption und die beschriebene technische Realisierung führen zu Spitzenwerten für die Empfindlichkeit und die Detektivität. In [6] hat VAN HERWAARDEN (*Technische Hochschule Delft*) die PTI-Thermosäule mit entsprechenden Thermosäulentypen anderer Hersteller verglichen und kommt zu dem Ergebnis, daß die PTI-Thermosäule die besten Parameter aufweist. Die Tafel zeigt eine Zusammenstellung der Parameter des Sensortyps mit der Bezeichnung TS-50.1.

Eine einfache Abschätzung zeigt, daß mit diesem Sensor die Strahlung von Objekten im Zimmertemperaturbereich unproblematisch nachgewiesen werden kann.

Für die Signalspannung gilt unter vereinfachenden Annahmen (die Empfängerfläche A sei klein im Verhältnis zum Objektabstand D, Objektoberfläche A_0 und Empfängerfläche seien zueinander parallel)

$$U = \frac{\varepsilon\sigma}{\pi} \frac{A_0 A}{D^2} \cdot (T_0^4 - T_S^4) \cdot S \tag{4}$$

oder für den Fall, daß das Objekt ausreichend groß ist, um das Gesichtsfeld des Sensors voll auszufüllen,

$$U = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot \tan^2 \frac{\varphi}{2} \cdot (T_0^4 - T_S^4) \cdot S\,. \tag{5}$$

ε Emissionsfaktor; σ Stefan-Boltzmann-Konstante; T_0 Objekttemperatur; T_S Sensortemperatur; φ Öffnungswinkel

Bei einer Sensortemperatur von 300 K und einer Empfindlichkeit von 50 V/W erhält man damit für ein Objekt, das ideal emittiert und eine Temperaturüberhöhung von 1 K gegenüber dem Sensor aufweist, eine Signalspannung von rund 0,8 mV.

Im Laufe der Entwicklung der Miniatur-Strahlungsthermosäulen im PTI gelang seit etwa 1984 eine weitere Steigerung von deren Empfindlichkeit. Durch entsprechende Optimierungsmaßnahmen können nunmehr auch Sensoren mit Empfindlichkeiten im Bereich von $S = 90 \ldots 110$ V/W bei Zeitkonstanten von $\tau = 60 \ldots 65$ ms für Spezialanwendungen angeboten werden.

4. Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit

Beim Einsatz der Sensoren zur berührungslosen Temperaturmessung ist es erforderlich, den Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Empfindlichkeit zu kennen, um erforderlichenfalls entsprechende Korrekturmaßnahmen vornehmen zu können. Zur experimentellen Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der Sensorparameter wurde eine spezielle computergestützte automatisierte Meßeinrichtung aufgebaut, mit der eine Vielzahl von Sensoren gleichzeitig vermessen werden kann. Der Temperaturverlauf der Empfindlichkeit erwies sich für alle untersuchten Sensoren im Rahmen der Meßgenauigkeit mit Temperaturkoeffizienten zwischen —0,4 und —0,65%/K als linear. Neben der Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit ist bei Strahlungsthermosäulen das Bezugspotential (der „Nullpunkt" der Signalspannung) selbst temperaturabhängig. Bei Änderung der Umgebungstemperatur entsteht ein Spannungssignal, das nicht mit der zu messenden Strahlung im Zusammenhang steht und der Signalspannung additiv bzw. subtraktiv überlagert ist. Im Wechsellichtbetrieb ist die Lage des „Nullpunktes" der Signalspannung ohne Bedeutung, bei Gleichlichtsignalverarbeitung muß die Verschiebung des Bezugspotentials berücksichtigt werden. Zur Kompensation der Empfindlichkeitsänderung und zur Korrektur der Verschiebung des Referenzpotentials infolge Umgebungstemperaturschwankungen ist es erforderlich, die Temperatur der Referenzkontakte möglichst genau zu erfassen.

5. Integrierte Temperaturfühler

Da die exakte Temperatur der Referenzkontakte nur in deren unmittelbaren Nähe, möglichst sogar auf dem Sensorchip selbst, zum interessierenden Zeitpunkt gemessen werden kann, wurden im PTI Arbeiten zur Integration zusätzlicher berührender Temperaturfühler

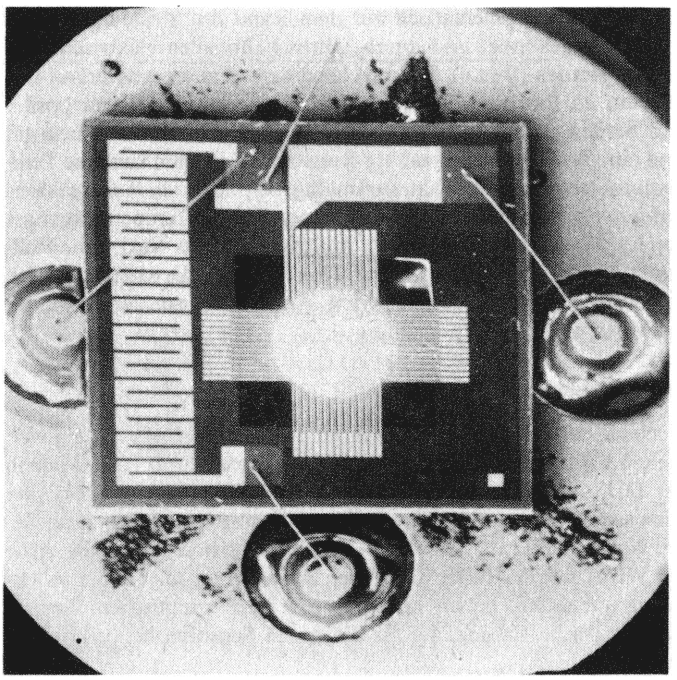
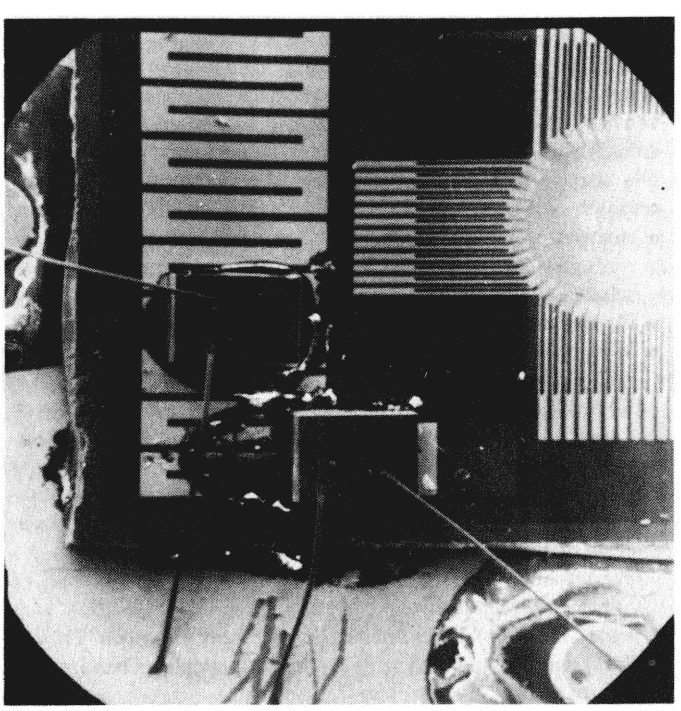


Bild 3. Si-Chip mit Thermosäulenstruktur und mäandrierter Bi-Widerstandsdünnschicht auf TO-5-Sockel (Rasterelektronenmikroskopaufnahme)

in das Innere des Sensorgehäuses durchgeführt. Als passive Temperaturfühler wurden Bi-Widerstandsdünnschichten [7] (vgl. Bild 3) sowie kleine Thermistoren und als aktive Temperaturfühler Si-Chiptransistoren sowie integrierte Si-Temperatursensoren vom Typ B 511 verwendet. Über diese Arbeiten ist in [8] berichtet worden. Gegenwärtig werden vor allem kompensationsvorbereitete Sensoren, die mit der temperaturabhängigen Stromquelle B 511 bestückt sind, von den Anwendern eingesetzt (Typenbezeichnung TS-50.1 K).

Da der Temperaturkoeffizient des Stromes der B 511 geringer als der Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit ist, muß zur Kompensation ein relativ großer schaltungstechnischer Aufwand betrieben werden. Der Einsatz von Si-Temperaturfühlern nach dem Spreading-Resistance-Prinzip ermöglicht dagegen eine einfachere Temperaturkompensation. Die Spreading-Resistance-Sensoren können als

Bild 4. Ausschnitt aus einem Strahlungsthermosäulenchip mit Spreading-Resistance-Kompensationselementen (Rasterelektronenmikroskopaufnahme)



Nacktchips unproblematisch auf dem Rand des Strahlungssensorchips klebegebondet und durch Ultraschallbonden elektrisch kontaktiert werden (Bild 4). Entsprechend dem Widerstandsverlauf von Silizium im Extrinsic-Bereich ist ihr Temperaturkoeffizient positiv und beträgt etwa 0,75%/K. Die Abweichungen von der Linearität sind nur gering. Mit 2 Spreading-Resistance-Sensoren kann die Temperaturkompensation schaltungsmäßig besonders einfach realisiert werden. Ein Sensor wird zur Kompensation des Temperaturganges der Empfindlichkeit verwendet, mit dem anderen wird die „Nullpunktverschiebung" kompensiert. Das PTI kann die entsprechenden Schaltungsunterlagen interessierten Anwendern zur Nachnutzung zur Verfügung stellen.

6. Anwendungen

Nachdem in den letzten drei Jahren aus einer Laborfertigung weit mehr als 1000 Sensoren der Typen TS-50.1 bzw. TS-50.1 K innerhalb der DDR nicht nur an Forschungs- und Entwicklungslabors von wissenschaftlichen Einrichtungen und Industriebetrieben ausgeliefert worden sind, sondern auch verschiedene produzierende Bereiche der Wirtschaft der DDR mit diesen Sensoren bereits Geräte serienmäßig ausstatten, haben sich aufgrund ihrer spezifischen Vorteile einige typische Einsatzfälle für die neuen Sensoren herauskristallisiert:

- Die hohe Empfindlichkeit gestattet entsprechend genaue Messungen von Licht- und Strahlungsintensitäten (Beispiele: bei spektralanalytischen Untersuchungen zur Gewässerreinhaltung oder bei der Positionserkennung an landwirtschaftlichen Maschinen oder bei der Ermittlung von Feuchtigkeitsgraden anhand von speziellen Reflexionsmessungen).
- Die hohen Sensorausgangssignale ermöglichen, selbst bei der Erfassung von Temperaturen in Niedertemperaturbereich, einen unproblematischen Anschluß von Meß-, Steuer- und Regelsystemen. Die Sensoren haben sich in dieser Hinsicht z. B. bereits im praktischen Einsatz bei der Überwachung einer industriellen Anlage zur Herstellung von Mineralwolleplatten bewährt. Dabei durchläuft jede Mineralwolleplatte einen „Sensorgürtel", der aus 10 bis 20 Sensoren besteht, die in solchem Abstand voneinander angeordnet sind, daß durch entsprechende Überdeckung ihrer Einzelmeßfelder eine lückenlose Erfassung aller oberen, seitlichen und unteren Oberflächenbereiche der Platten gewährleistet ist und somit Heißstellen, die potentielle Brandherde während des Weitertransports der Platten darstellen, sicher erfaßt werden, so daß kritische Platten sofort automatisch aussortiert werden können.
  An anderer Stelle werden die TS-50.1K z. B. auch verwendet, um Induktionsheizungen zu steuern, die mit Plaste zu ummantelnde Rohre auf Temperaturen innerhalb eines enger tolerierten Optimalintervalls aufheizen sollen.
  Schließlich testet ein weiterer Anwender zur Zeit die Möglichkeiten, mit dem Sensor Reibungswärme zu erkennen, die infolge von Schlupf an Förderbändern auftritt und schnell zu Überhitzungen und Bränden führen kann.
- Die kleinen Sensorabmessungen und das geringe Sensorgewicht erwiesen sich insbesondere dort als Vorteil, wo ein Sensor
  - einzusetzen ist, der aufgrund seiner speziellen Anordnung im optischen Strahlengang nur eine geringe unvermeidliche Abschattung hervorruft
  - für ein tragbares, möglichst leichtes Handgerät gesucht wird
  - in eine Anlage eingebaut werden muß, in der wenig Platz für diesen Sensor zur Vergügung steht.

  Unter diesem Aspekt haben sich bereits eine Reihe von Anwendungen ergeben, bei denen vakuumfeste Sensoren zur Temperaturmessung an Substraten (u. a. an Si-Scheiben) eingesetzt wurden, während diese Substrate unter einer Hochvakuumglocke Hochtemperatur-, Beschichtungs- oder Ätzprozessen ausgesetzt waren.
  Serienmäßig wird der TS-50.1K-Sensor in einer modernen mikrorechnergesteuerten Ultrazentrifuge (Typ UP 65 m vom *VEB MLW Medizintechnik Leipzig/Zentrifugenbau Engelsdorf*) eingesetzt, wobei seine Kleinheit ausschlaggebendes Kriterium war.
- Die hohe Strahlungsbelastbarkeit der Sensoren (ihr Linearitätsbereich endet bei etwa 12 mW/mm²) hat sich im Rahmen von brandschutztechnischen Untersuchungen und auch im Bereich der Arbeitsmedizin bewährt.
  So wurde damit z. B. die von Glasschmelzwannen ausgehende Wärmestrahlungsbelastung auf Arbeitsplätzen untersucht. Der Sensor findet im Infrarotbestrahlungsstärkemeßgerät „IBM 02-1" (*Elektronischer Gerätebau Haynl, Eggersdorf*) serienmäßigen Einsatz. Schließlich eignet sich der hochempfindliche Sensorchip, montiert in ein Spezialgehäuse, auch als Wärmestromsensor, wie er für arbeitshygienische Untersuchungen an Hautoberflächen benötigt wird.

Zusammenfassung

Zur Befriedigung des zunehmenden Bedarfs an Temperatursensoren wurden im PTI miniaturisierte Dünnschichtstrahlungssensoren entwickelt. Die Sensoren wurden als Strahlungsthermosäulen konzipiert und bestehen aus einer Vielzahl in Reihe geschalteter Bi-Sb-Dünnschichtthermoelemente, die auf einem Si-Chip mit einem freitragenden Folienbereich angeordnet sind. Die Sensoren weisen Empfindlichkeiten auf, die um den Faktor 2 bis 3 höher als die vergleichbarer Typen sind. Durch die Anordnung zusätzlicher berührender Temperaturfühler im Inneren ihres Gehäuses ist es möglich, die Änderung der Empfindlichkeit bei Umgebungstemperaturschwankungen zu korrigieren. Die Sensoren können daher in einem breiten Umgebungstemperaturbereich für genaue Temperaturmessungen eingesetzt werden, was bisher in einer Vielzahl von Anwendungen erfolgreich erprobt worden ist.
Die vom PTI entwickelten Sensoren werden ab 1989 vom *VEB Feinoptik Bad Blankenburg*[1]) hergestellt und können dort bezogen werden.

Literatur

[1] Kortum, H.: Bemerkungen zu den Thermoelementen des VEB Carl Zeiss Jena. Feingerätetechnik, Berlin 9 (1960) 6.
[2] Elbel, T.; Müller, J. E.; Völklein, F.: Miniaturisierte thermische Strahlungssensoren: die neue Thermosäule TS-50.1. Feingerätetechnik, Berlin 34 (1985) 3, S. 113—115.
[3] Elbel, T.; Müller, J. E.; Völklein, F.: Thermoelektrischer Detektor. DDR-Patent 221 604 (1983) (bzw. US-Pat. 4,665,276).
[4] Lahiji, G. R.; Wise, K. D.: A batch-fabricated silicon thermopile infrared detector. IEEE Trans. El. Dev. ED-29 (1982), S. 14—22.
[5] Lerm, A.; Wiegand, A.; Köhler, M.: DDR-Patentanmeldungen WP C23F/255358-8 und C23F/255359-6 (1983).
[6] Van Herwaarden, A. W.; Sarro, P. M.: Thermal sensors based on the Seebeck effect. Sensors and Actuators 10 (1986), S. 321—345.
[7] Baier, V.: Verfahren zur Herstellung temperaturkompensierter Dünnschicht-Thermosäulen. DDR-Patent 232 981 (1984).
[8] Elbel, T.; Müller, J. E.: Miniatur-Strahlungsthermosäule mit integriertem Temperaturfühler. „TEMPERATUR '86" — Tagungsband 81 der KDT Suhl, 1986, S. 126—130.

msr 8880

[1]) VEB Feinoptik Bad Blankenburg, Obere Marktstraße 3, Bad Blankenburg, 6823.

Aufgaben, Ziele und Gremien der WGMA

Die Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der Kammer der Technik (KDT) der DDR sieht ihre Hauptaufgabe in der Entwicklung der sozialistischen Gemeinschaftsarbeit und der interdisziplinären Arbeit auf den Gebieten der Meß- und Automatisierungstechnik und angrenzender Disziplinen sowie der Informatik-Anwendung in ihrem Fachbereich.

Die WGMA konzentriert ihre Tätigkeit auf

- die Förderung des wissenschaftlichen Vorlaufs
- die Unterstützung der Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen
- die rasche Umsetzung neuester wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse in die Volkswirtschaft
- die internationale Arbeit innerhalb der IFAC und der IMEKO.

Die WGMA ist bestrebt, ihren Wirkungskreis zu erweitern und sich innerhalb der Ingenieurorganisation weiter als zentrales Fachorgan für die Meß- und Automatisierungstechnik zu profilieren.

Für ihre Arbeit bedient sich die WGMA

- ihrer Vorstandssitzungen
- der Tätigkeit ihrer Arbeitsgremien (Fachausschüsse und deren Fachunterausschüsse)
- der Publikationstätigkeit, vor allem in den von ihr herausgegebenen Zeitschriften messen—steuern—regeln (msr) und Feingerätetechnik sowie in der Technischen Gemeinschaft
- wissenschaftlich-technischer Veranstaltungen (Tagungen, Kolloquien, Symposien, Rundtischgespräche)
- gezielter Weiterbildungsmaßnahmen sowie Fachberatungen in speziellen Konsultationspunkten.

Die konzeptionelle und koordinierende Arbeit zum Zusammenwirken der Arbeitsgremien erfolgt durch den Vorstand.

Über die Vermittlung und den Austausch von neuem Wissen und Erfahrungen zwischen Herstellern, Anwendern und wissenschaftlichen Institutionen will die WGMA einen besonderen Beitrag zur Steigerung der Qualität und Zuverlässigkeit der Produktion, zur Einsparung von Energie und Material und damit zur Intensivierung und Erhöhung der Effektivität der Volkswirtschaft durch die Meß- und Automatisierungstechnik erbringen.

Vor allem im Hinblick auf die Erhöhung des Leistungsniveaus in Forschung, Entwicklung und Produktion erfolgt die Realisierung der genannten Zielstellungen

- durch eine kontinuierliche Arbeit in der Aus- und Weiterbildung und durch den interdisziplinären Erfahrungsaustausch über die Grenzen der spezifischen Industriebereiche hinaus
- durch die gezielte Einbeziehung breiter Fachkreise
  - bei internationalen und nationalen wissenschaftlich-technischen Veranstaltungen (Tagungen, Kolloquien, Symposien)
  - in die Arbeit der Konsultationspunkte
  - zu Fachberatungen und Rundtischgesprächen
- durch eine zielgerichtete Publikationstätigkeit und Öffentlichkeitsarbeit zur Vermittlung neuester Erfahrungen und Erkenntnisse
- durch die Integration breiter Fachkreise in die Arbeit der bestehenden Fachgremien.

Die aus der sozialistischen Gemeinschaftsarbeit gewonnenen Erkenntnisse werden z. B. in Form von KDT-Standpunkten zusammengefaßt und den staatlichen und wirtschaftsleitenden Organen, den Kombinaten und Betrieben zur Nutzung bei der Entscheidungsvorbereitung und -findung übergeben.

Die WGMA nimmt die Interessen der DDR auf dem Gebiet der Meß- und Automatisierungstechnik im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit in den nichtstaatlichen Organisationen International Measurement Confederation (IMEKO) und International Federation of Automatic Control (IFAC) sowie mit den sozialistischen Ingenieurorganisationen aktiv wahr.

Um die genannten Aufgaben zu lösen, hat die WGMA bisher 25 Fachausschüsse (FA) und 55 Fachunterausschüsse (FUA) gebildet, in denen KDT-Mitglieder aus der Industrie, den Hochschulen, den Akademien sowie aus staatlichen und wirtschaftsleitenden Organen aktiv mitwirken. Die Fachausschüsse beschäftigen sich vornehmlich mit komplexen Aufgaben zur Förderung der Anwendung und Entwicklung von Geräten und Gerätesystemen, von Strategien und Methoden der Meß- und Automatisierungstechnik im industriellen und nichtindustriellen Bereich sowie der Automatisierung der Leitung und Planung in wissenschaftlichen und ökonomischen Bereichen. Die Arbeit der Fachunterausschüsse orientiert sich auf spezielle Teilprobleme der Meß- und Automatisierungstechnik sowie der Automatisierung von Leitungsprozessen unter Einbeziehung besonderer Aufgaben der rechnergestützten Arbeit und der arbeitswissenschaftlichen Aspekte der Automatisierung.

Die Arbeit der WGMA regelt sich entsprechend den Statuten der sozialistischen Ingenieurorganisation Kammer der Technik.

Gegenwärtig ist die WGMA wie folgt gegliedert:

Vorsitzender:
Prof. Dr. sc. techn. WERNER RICHTER
Ehrenvorsitzender:
Prof. Dr. sc. techn. HEINZ TÖPFER
Stellv. Vorsitzender und Sekretär:
Dipl.-Ing. KLAUS-DIETER MÜLLER
Stellv. Vorsitzender für Automatisierungstechnik:
Prof. Dr. sc. techn. HANS FUCHS
Stellv. Vorsitzender für Meßtechnik:
Prof. Dr.-Ing. habil. DIETRICH HOFMANN
Vorstandsmitglieder:
Prof. Dr. sc. techn. GEORG BRACK, Prof. Dr. sc. techn. WOLFGANG FRITZSCH, Prof. Dr.-Ing. MANFRED GÜNTHER, Dipl.-Phys. JOACHIM HAHNE, Dr. sc. techn. KLAUS HASCHE, Dr.-Ing. INGRID HERMSDORF, Doz. Dr. sc. techn. HANS-DIETRICH KLABUHN,

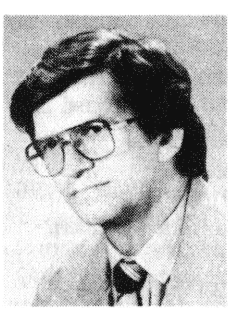


Bild 1. Prof. W. RICHTER

Bild 2. Prof. H. TÖPFER

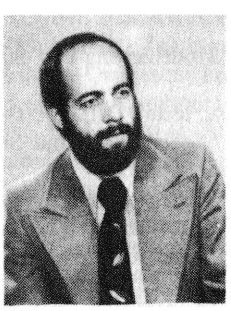


Bild 3. K.-D. MÜLLER

Bild 4. Prof. H. FUCHS

Bild 5. Prof. D. HOFMANN

Dr.-Ing. PETER KUNTSCHE, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. WERNER LOTZE, Prof. Dr. sc. techn. RAINER MÜLLER, Prof. Dr. sc. techn. PETER NEUMANN, Prof. Dr. sc. oec. JOCHEN PICHT, Prof. em. Dr. sc. techn. Dr.-Ing. E. h. KARL REINISCH, Dr. rer. nat. KARL SCHMIDT, Prof. Dr. sc. nat. ACHIM SYDOW, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. HARRY TRUMPOLD, Prof. Dr. sc. techn. JÜRGEN WERNSTEDT, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. EUGEN-GEORG WOSCHNI, Prof. Dr. sc. techn. HANS-JOACHIM ZANDER.

Arbeitsgremien der WGMA und Vorsitzende:

FA 1 Meßsysteme
Prof. Dr. sc. techn. HEINZ GATZMANGA
FUA 1.1 Photoelemente
Prof. Dr. sc. nat. KLAUS HERRMANN
FUA 1.2 Elektronische Meßtechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. UWE FRÜHAUF
FUA 1.3 Infrarot-Meßtechnik
Dr.-Ing. KLAUS-DIETER KASCHMIERZECK
FUA 1.4 Feuchtemeßtechnik
Doz. Dr. sc. techn. DIRK HEINZE
FUA 1.5 Durchflußmeßtechnik
Dr.-Ing. GERD URNER
FUA 1.6 Kraftmeß- und Wägetechnik
Dr.-Ing. NORBERT SCHENKE
FUA 1.7 Temperaturmeßtechnik
Dr. sc. techn. ERWIN KAISER

FA 2 Automatisierungstechnik für diskrete Fertigungsprozesse
Prof. Dr. sc. techn. WOLFGANG FRITZSCH
FUA 2.1 Querschnittsprobleme der rechnerautomatisierten Fertigung
Dr.-Ing. KLAUS RISTAU
FUA 2.2 Steuerung für Transport- und Lagerprozesse
Dr.-Ing. WOLFGANG DÜNISS
FUA 2.3 Prozeß- und Qualitätssicherung der rechnerautomatisierten Fertigung
Dr. sc. techn. ROLF MANGELSDORF
FUA 2.4 Automatisierungssysteme der rechnerautomatisierten Fertigung
Dr.-Ing. HELMUT KESSNER

FA 3 Rechnergestützte Meßtechnik und Qualitätssicherung
Prof. Dr.-Ing. habil. DIETRICH HOFMANN
FUA 3.1 Meßtheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. DIETRICH HOFMANN
FUA 3.2 Rechnergestützte Meßtechnik
Doz. Dr. sc. techn. GERHARD LINSS
FUA 3.3 Rechnergestützte Qualitätssicherung
Doz. Dr.-Ing. HORST REINECK
FUA 3.4 Rechnergestütztes Training
Doz. Dr. Dr. paed. BERND MICHEL

FA 4 Metrologie und Standardisierung
Dr. rer. nat. KARL SCHMIDT
FUA 4.1 Allgemeine Metrologie
Prof. em. Dr. rer. nat. habil. HANS HART
FUA 4.2 Meßmittelprüfung
Dr.-Ing. DIETER MÖGEL
FUA 4.3 Metrologie im Umweltschutz
Dr. sc. techn. HANS-JÖRG GROSSE

FA 5 Aus- und Weiterbildung in der Meßtechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. EUGEN-GEORG WOSCHNI

FA 6 Automatisierungssysteme
Prof. Dr. sc. techn. PETER NEUMANN
FUA 6.1 Automatisierungsanlagen
Dr.-Ing. DIETER KÜCHLER
FUA 6.2 Elektronische Automatisierungsgeräte
Dipl.-Ing. RUDOLF SCHMIDT
FUA 6.3 Nichtelektronische Automatisierungsgeräte und Stelltechnik
Dr.-Ing. KLAUS GRECKSCH
FUA 6.4 Kommunikationssysteme in der Automatisierungstechnik
Dr.-Ing. JÖRG HÄHNICKE
FUA 6.5 Realisierung und Instandhaltung von Automatisierungsanlagen
Dr. oec. GUNTER VENUS
FUA 6.6 Geschichte der Automatisierungstechnik
Dr. paed. Dipl.-Ing. HANS ROHR

FA 7 Rechnersysteme und -anwendungen
Dr.-Ing. PETER KUNTSCHE
FUA 7.1 Rechnerkommunikation
Prof. Dr. sc. techn. HELMUT LÖFFLER
FUA 7.2 Basissoftware
Dr. rer. nat. WERNER BORN

FA 8 Theorie der automatischen Steuerung
Dr. sc. techn. JAN LUNZE
FUA 8.1 Prozeßanalyse und Modellbildung
Dr. sc. techn. HANS-HELMUT WILFERT
FUA 8.2 Basissteuerungen
Dr. sc. techn. JAN LUNZE
FUA 8.3 Hierarchische Optimierung großer Prozesse
Dr. sc. techn. HORST PUTA
FUA 8.4 Steuerung und Optimierung diskreter Prozesse
Prof. Dr. sc. techn. HANS-JOACHIM ZANDER

FA 9 Modellierung und Simulationstechnik
Prof. Dr. sc. nat. ACHIM SYDOW
FUA 9.1 Theoretische Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik
Prof. Dr. sc. nat. ACHIM SYDOW
FUA 9.2 Simulationstechnik in der chemischen Verfahrenstechnik
Dr.-Ing. MANFRED WAGNER
FUA 9.3 Modellierung und Simulation in der Ökonomie
Prof. Dr. sc. oec. Dr.-Ing. JOHANN-ADOLF MÜLLER
FUA 9.4 Modellierung und Simulation im Sport
Prof. Dr. sc. techn. PETER SCHACKE
FUA 9.5 Modellierung und Simulation in der Informatik
Prof. Dr. rer. nat. habil. GUNTER SCHWARZE
FUA 9.6 Modellierung und Simulation in Land- und Forstwirtschaftlichen Prozessen
Dr. rer. nat. habil. KLAUS BELLMANN
FUA 9.7 Modellierung und Simulation in wasserwirtschaftlichen Prozessen
Dr. sc. techn. STEFAN KADEN

FA 10 Projektierung von Automatisierungsanlagen
Prof. Dr. sc. techn. RAINER MÜLLER
FUA 10.1 Projektierung von Automatisierungsanlagen für Energieumwandlungsprozesse
Prof. Dr. sc. techn. WOLFGANG TEICHMANN
FUA 10.2 Projektierung von Binärsteuerungen
Dr.-Ing. RAINER JORK
FUA 10.3 Anlagenautomatisierung für Stückgutprozesse
Dr.-Ing. ADOLF WEIGT

FA 11 Automatische Bildverarbeitung
Dr. sc. nat. REINHARD KLETTE

FA 12 Zuverlässigkeit automatisierter Systeme
Prof. Dr. sc. techn. KLAUS FISCHER
FUA 12.1 Zuverlässigkeit
Prof. Dr. sc. techn. HEINRICH PREUSS
FUA 12.2 Instandhaltung
Prof. Dr. sc. techn. Dr. rer. nat. FRANK BEICHELT

FA 13 Arbeitswissenschaftliche Aspekte der Automatisierung
Doz. Dr. sc. techn. HANS-DIETRICH KLABUHN
FUA 13.1 Arbeitsinhalt und Arbeitsgestaltung
Dr. sc. techn. MICHAEL SCHMIDT
FUA 13.2 Arbeits- und ingenieurpsychologische Bewertung und Gestaltung
Doz. Dr. sc. nat. BÄRBEL BERGMANN
FUA 13.3 Klassifizierung und Bewertung der Operateurtätigkeit
Dr.-Ing. MICHAEL AMOS
FUA 13.4 Analyse und Synthese automatisierter Systeme
Dr. oec. Dipl.-Ing. oec. WALTER GRESCHNER
FUA 13.5 Leitstellen
Dipl.-Ing. UWE HOFFMANN

FA 14 Automatisierte Systeme der Leitung
Prof. Dr. rer. nat. Dr. oec. habil. GERHARD VOIGT

FA 15 Automatisierung in der Leitung und Planung
Prof. Dr. sc. oec. JOCHEN PICHT
FUA 15.1 Büroautomatisierung
Dr. oec. FRIEDRICH REBBELMUND
FUA 15.2 Datenbanken
Dr. sc. oec. WOLFGANG ABT

FA 16 Rechenzentren
Prof. Dr. sc. oec. KLAUS GARBE
FUA 16.1 Betriebssysteme
Dipl.-Math. THOMAS HÖSE
FUA 16.2 Betrieb von Kleinrechnern
Dr.-Ing. TIM RETTER
FUA 16.3 Rechenbetriebsorganisation
Dipl.-Math. HANS-WERNER SCHOBER
FUA 16.4 Systemprogrammierung
Dr.-Ing. HELMUT JUNG

FA 17 Systemanalyse und -organisation
Dr. oec. CHRISTOPH ANSPACH

FA 18 Meß- und Automatisierungstechnik in biotechnologischen Prozessen
Prof. Dr. sc. techn. GEORG BRACK
FUA 18.1 Automatisierung verfahrenstechnischer Experimente
Dr. sc. techn. GERALD LORENZ

FA 19 Meß- und Automatisierungstechnik in fertigungstechnischen Prozessen
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. WERNER LOTZE
FUA 19.1 Koordinatenmeßtechnik
Dr.-Ing. EBERHARD BRESSEL

FA 20 Aus- und Weiterbildung in der Automatisierungstechnik
Prof. Dr.-Ing. MANFRED GÜNTHER

FA 21 Meß- und Automatisierungstechnik in nichtindustriellen und landwirtschaftlichen Prozessen
Prof. Dr. sc. techn. LADISLAUS KOLLAR

FA 22 Automatisierungsstrategie
Prof. Dr. sc. techn. HEINZ TÖPFER

FA 23 Verkehrskybernetik
Prof. Dr. sc. techn. HORST STROBEL

FA 24 Mikrorechner-Software
Prof. Dr. sc. techn. DIETER WERNER

FA 25 Beratungs-/Expertensysteme in der Automatisierungstechnik
Prof. Dr. sc. techn. JÜRGEN WERNSTEDT

Kombinatsaktiv
Kombinat Datenverarbeitung
Dr. rer. oec. ROLAND STEMMLER

Von der WGMA herausgegebene **Fachzeitschriften:**

messen — steuern — regeln (msr)
Verantw. Redakteur: Dr.-Ing. DIETRICH WERNER

Feingerätetechnik
Verantw. Redakteur: Dipl.-Ing., Dipl.-Journ. HELMUT WAHLSTAB

Die Vermittlung von Kontakten zu den Arbeitsgremien der WGMA erfolgt über:

Kammer der Technik
Präsidium
Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik
Clara-Zetkin-Straße 115—117
PSF 1315
Tel.: 22 65 218/304
Telex: 011 4841

msr 8916 W. RICHTER, K.-D. MÜLLER

Rechnergestützte Qualitätssicherung CAQ '88

Während der Leipziger Frühjahrsmesse 1988 fand vom 17. bis 19. März 1988 das Internationale Messesymposium Rechnergestützte Qualitätssicherung (Computer-Aided Quality Assurance) CAQ '88 statt. Es wurde vom Präsidenten der Kammer der Technik, Frau Prof. Dr. Dr. D. HÜLSENBERG, eröffnet und diente der Vermittlung von neuen Erkenntnissen und dem Austausch von praktischen Erfahrungen zu neuen CAQ-Systemen und -Strategien, zu CAQ-Werkzeugen und -Anwendungen, zum Wechselverhältnis zwischen Meßtechnik und Qualitätssicherung sowie CIM und CAQ. Darüber hinaus wurden Fragen der CAQ-Aus- und Weiterbildung behandelt.

Das internationale Messesymposium wurde von der Wissenschaftlich-Technischen Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der Kammer der Technik gemeinsam mit dem Kombinat VEB Carl Zeiss JENA, VEB Kombinat Robotron, VEB Kombinat Elektro-Apparate-Werke „Friedrich Ebert", VEB Kombinat Mikroelektronik, VEB Kombinat Kabelwerk Oberspree, VEB Kombinat Fahrzeugelektrik und anderen Industriekombinaten in Zusammenarbeit mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Sektion Technologie, sowie weiteren Universitäten und Hochschulen der DDR veranstaltet.

Mehr als 400 Teilnehmer aus 15 Ländern und Berlin (West) hörten 32 Plenarvorträge zu neuen CAQ-Konzepten (D. HOFMANN, DDR; Y. KNELLER, UdSSR; T. PFEIFER, BRD), zu Sensor- und Testertechnik (H. TRUMPOLD, DDR; A. NOMOTO, Japan; R. JOHNSON, USA; H. SIEBERT, DDR), zur Qualitätssicherung im Schwermaschinen- und Getriebebau (P. SCHÄCKE, DDR; L. KUHN, ČSSR; H.-J. MARCOUR, BRD), zur Herstellung von Preforms für Lichtwellenleiter (D. VANEK, M. HORN, DDR) sowie zur Anwendung von Inspektionsrobotern (T. FUKUDA, Japan; N. NESSLER, Österreich).

Relativ großen Raum nahmen unterschiedlichste Verfahren der zerstörungsfreien CAQ-Diagnose ein, und zwar von der schnellen Bildverarbeitung und CCD-Technik (R. HÖFLING, DDR; H. TROMPTER, DDR) über Bauelemente- und Leiterkartentestung (U. FRÜHAUF, DDR; W. WOLBER, USA; A. SOWINSKI, VRP; G. SCHENDERLEIN, DDR) bis hin zu speziellen Methoden der Schall-, Schwingungs- und Temperaturanalyse (W. MORGNER, DDR; J. JEDRZEJEWSKI, VRP; A. BOSHKO, UdSSR), teilweise auch für die biomedizinische Gerätetechnik (A. JOBAGGY u. a., UVR). Neue Aspekte der rechnerintegrierten Qualitätssicherung in automatisierten flexiblen Fertigungssystemen wurden insbesondere aus der Sicht der Systemstrukturen und der einsetzbaren Prüftechnik behandelt (H. WÜRPEL, DDR; H.-J. WARNECKE, BRD; L. BENETAZZO, Italien; E. HELDT, DDR; R.-J. AHLERS, BRD; H. WULF, DDR).

Außerdem standen methodische Probleme für das CAQ-Training (K. KARIYA, Japan; I. HERMSDORF, CH. GEBERT, DDR) auf der Tagesordnung.

Die Volltexte der Plenarvorträge wurden in reich bebilderten Tagungsmaterialien „Rechnergestützte Qualitätssicherung (Computer-Aided Quality Assurance) CAQ '88", Band 1, Hrsg. D. HOFMANN, Berlin: Kammer der Technik 1988 (331 Seiten) in deutscher oder englischer Sprache zusammengestellt.

In analoger Weise stehen die Volltexte der 24 Posterbeiträge mit vielen detaillierten Informationen zu CAQ-Messung, -Überwachung, -Analyse und -Gerätetechnik in Band 2 (185 Seiten) zur Verfügung. Zur schnelleren Einführung der rechnergestützten Qualitätssicherung wurde auch das KDT-Trainingsprogramm mit INQUAMESS-Programmpaket von D. HOFMANN u. a.: Rechnergestützte Qualitätssicherung CAQ, BC-KC-MC-PC-Applikationen, Listings. Berlin: Kammer der Technik 1988 als Tagungsmaterial mit ausgegeben. Es umfaßt 14 ausgedruckte und kommentierte Quellprogramme zu Meßdatenerfassung, Meßdatenverarbeitung und Meßdatenmanagement.

Besonders die ausländischen Teilnehmer nutzten die Möglichkeit, sich von der Leistungsfähigkeit sowohl der Gerätetechnik für CAQ als auch der praktischen Anwendung qualitätssichernder Maßnahmen in der Produktion des VEB Kombinat Robotron in einem organisierten Messerundgang sowie einem Rundtischgespräch mit TKO-Direktor HANSCHUR zu überzeugen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen machen:

1. Der Weltmarkt ist durch einen Überfluß qualitativ hochwertiger Waren gekennzeichnet, so daß die Hersteller gezwungen sind, sich als Anbieter von Qualitätserzeugnissen und -dienstleistungen um die Gunst der zahlungsfähigen Kunden insbesondere in den hochentwickelten Industrieländern zu bewerben.
2. Das Verbraucherverhalten tendiert zunehmend zur Forderung nach bedarfsdeckenden, zuverlässigen und preiswerten Erzeugnissen, deren Lebensdauer nicht mehr durch ihr technisches Versagen, sondern nur noch durch ihren moralischen Verschleiß bestimmt wird.
3. Der Lebensstil in den hochentwickelten Industrieländern ist durch ein schnelles Anwachsen des massenhaften Material-,

Bild 1. Blick ins Auditorium des Messesymposiums
In der 1. Reihe v. l. n. r. zu erkennen: T. PFEIFER/BRD (IMEKO-Präsident 1979–1982), L. KUHN ČSSR (IMEKO-Präsident 1982–1985), H. TRUMPOLD/DDR (IMEKO-Präsident 1970–1973), W. WOLBER USA, R. JOHNSON USA, P. SCHÄCKE DDR

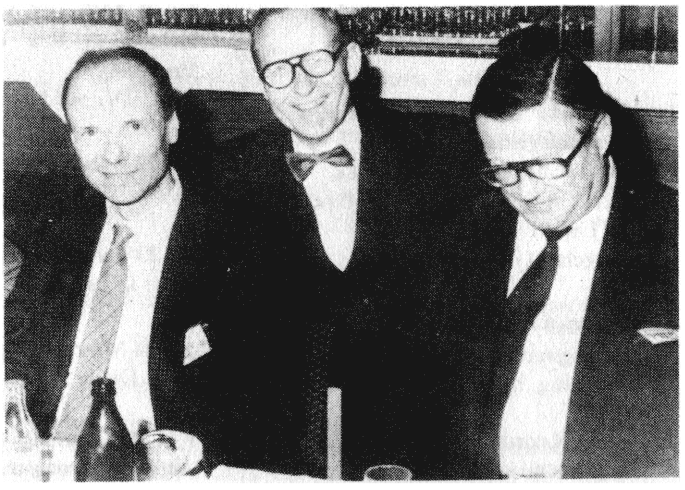


Bild 2. Im Gespräch
v. l. n. r.: Prof. Dr.-Ing. T. PFEIFER/RWTH Aachen (BRD), Prof. Dr.-Ing. habil. D. HOFMANN/FSU Jena, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. H. TRUMPOLD/TU Karl-Marx-Stadt

Energie- und Informationsverbrauchs gekennzeichnet, so daß Probleme der Material-, Energie- und Informationsbegrenzung und -ökonomie zunehmend ins Bewußtsein rücken.

4. Industrielle Reproduktionsprozesse werden in Richtung der flexiblen Automatisierung auch diskontinuierlicher Herstellungsverfahren weiterentwickelt, wobei die rechnerintegrierte Fertigung CIM (computer integrated manufacturing) als modernes strategisches Konzept zugrunde gelegt wird.
5. Die CIM-Strategie führt zu einer schrittweisen Verschmelzung der Produktions- und Büroautomatisierung und wirft insbesondere Probleme der eindeutigen und koppelfähigen Gestaltung von Terminologien, Schnittstellen und Gerätetechnik für die Informationsgewinnung und Verarbeitung auf.
6. Die Qualitätssicherung ist als integraler Bestandteil aller modernen industriellen Reproduktionsprozesse zu verstehen und praktisch umzusetzen, wobei die größten Reserven für die Steigerung der Arbeitsproduktivität in der Phase der Produktionsvorbereitung liegen.
7. Es gibt keine Qualität ohne Meßtechnik, wobei Qualitätsparameter weitestgehend durch meßbare Größen oder ihre meßbaren Stellvertreter definiert, gefertigt und geprüft werden müssen, weil erst dadurch Objektivität, Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Prüfbarkeit und Vergleichbarkeit intersubjektivierbar eindeutig zu bestimmen sind.
8. Universelle Personalcomputer-Instrumente UPCI sind eine neue zukunftsweisende Entwicklungsrichtung für intelligente Meßgeräte mit Mikrorechnern, weil Personalcomputer international in Stückzahlen von über 15 Millionen zur Verfügung stehen, weil international vereinheitlichte Betriebssysteme zur Verfügung stehen und die Personalcomputer auch mit international standardisierten Schnittstellen zur Datenübertragung ausgerüstet sind.
9. Die Sensortechnik mit sehr zahlreich vorhandenen bewährten Sensoren für die elektrische Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen zur Erfassung und Steuerung von Material-, Energie- und Informationsflüssen werden neuerdings durch mikroelektronische und faseroptische Sensoren ergänzt und teilweise ersetzt, wenn sich diese neuen Sensoren als besser und billiger gegenüber konventionellen Sensoren erweisen.
10. Die Programmtechnik für die rechnergestützte Qualitätssicherung muß zunehmend aus international erhältlichen bewährten Softwaremodulen und -paketen für Signalerfassung, Signalanalyse, Informationsverarbeitung, statistische Prozeßsteuerung und Datenmanagement aufgebaut werden, um ihre Einheitlichkeit, Vergleichbarkeit, Prüfbarkeit und Portabilität mit dem Ziel voranzutreiben, schließlich auch eine metrologische Prüfung und Bestätigung der Software zu ermöglichen.
11. Die Verknüpfung bzw. Verflechtung des rechnergestützten Entwurfs CAD (computer aided design) mit der rechnergestützten Herstellung CAM (computer aided manufacturing) und rechnergestützten Prüfung CAT (computer aided testing) zur rechnergestützten Qualitätssicherung CAQ (computer aided quality assurance) legt den Schwerpunkt produktivitätssteigernder Maßnahmen des Menschen in die CAD-Phase.
12. Die vollständig automatisierte Fabrik ist aus humanistischen, wirtschaftlichen und sozialen Gründen eher ein Gedankenmodell als eine real erstrebenswerte Zielstellung für die Zukunft.
13. Verbesserung und Erneuerung sind gleichrangig zu betreiben, weil sich insbesondere unter den Bedingungen kurzer Laufzeiten der Reifeprozeß von Entwicklungen über mehrere Typvarianten erstrecken muß.
14. Die menschliche Arbeitskraft ist die größte Reserve für Qualität und Wirtschaftlichkeit industrieller Reproduktionsprozesse, wenn der Mensch an der schöpferischen Gestaltung und Leitung seines Arbeitsprozesses beteiligt wird und seine Qualifikation ständig den neuen Anforderungen anpaßt.
15. Aus- und Weiterbildung müssen organisch miteinander verbunden und aufeinander abgestimmt sein, wobei die Ausbildung die notwendigen Vorkenntnisse mit den wissenschaftlich-technischen Grundlagen der Arbeitsprozesse und ihrer zukünftigen Entwicklungen vermittelt, während die Weiterbildung in gesetzmäßig steigendem Umfang die arbeitsplatzbezogene Qualifizierung zur praktischen Umsetzung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts leisten muß.

msr 8915

D. HOFMANN

Leipziger Frühjahrsmesse 1988 — Ein Rückblick (Teil 2)[1)]

Automatisierungssysteme

In diesem Jahr stellte der *VEB GRW Teltow* (*KAAB*) das bewährte **Prozeßleitsystem audatec** mit seinen Systemsteuerungen, insbesondere der **Systemkomponente „Wartenrechner"**, am Einsatzbeispiel „Tiefe Erdölverarbeitung" (Herstellung und Mischung von Vergaserkraftstoffen) vor. Der Einsatz führt zu bedeutenden ökonomischen Effekten und gewährleistet die Bereitstellung von Daten für die Lenkung des Raffinierkomplexes im Rahmen eines rechnergestützten Informations- und Lenkungssystems.

Der *VEB Geräte- und Regler-Werke Leipzig* (*KAAB*) präsentierte das hierarchisch aufgebaute **Mikrorechner-Automatisierungssystem MSA 5000** zur Überwachung, Binärsteuerung und Regelung in den Anwendungsbereichen Gebäudeautomation, allgemeine Industrieanlagen und Landwirtschaft. Das 2-Ebenen-System enthält die Systemkomponenten **Leitzentrale Z 500** mit peripheren Einrichtungen, **Unterstation M 500** und **Vorortstation V 500**.

Vom gleichen Betrieb wird das Leitsystem für die **Gewächshausautomatisierung GWA 5000** angeboten, das bei einer 2jährigen Erprobung im In- und Ausland sein hohes Leistungsvermögen bei unterschiedlichen Bedingungen unter Beweis gestellt hat. Neben den üblichen Meßwerterfassungs-, Binärsteuerungs- und Regelungsaufgaben erfolgt eine umfassende Datenerfassung und -aufbereitung.

Eine besonders interessante Neuheit stellt das **Industriecomputersystem ICA 700** vom *VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin, Stammbetrieb des KAAB*, dar. Es ist ein gestaffeltes, leistungsfähiges Familienkonzept von 16-bit-Industriecomputern. Vom Hersteller konfektionierte Gerätesysteme ermöglichen einen breiten Einsatz und die Realisierung von Aufgaben unterschiedlicher Komplexität.

Die Modularität der Baugruppen des für industrielle Umgebungsbedingungen ausgelegten ICA 700 sowie die Mehrrechner- und Mehrebenenstruktur des Systems ermöglichen eine flexible Anpassung an Aufgaben in der Produktionsautomatisierung. Das Gerätekonzept sieht einen Hauptrechner und Rechnersubsysteme vor. Abhängig vom Einsatzfall können in der Subsystemebene neben dem Industriecomputer auch speicherprogrammierbare Steuerungen der Familie MRS 700, audatec-Systemkomponenten und Automatisierungssysteme anderer Hersteller eingesetzt werden, deren Kopplung über V24-, IFSS- oder IFLS-Schnittstellen erfolgt. Das Konzept sieht folgende IC-Varianten vor:

▶ **Modulare Variante ICA 710.10, 720.10**
Konfektionierung und Einbau in Finalerzeugnisse durch den Anwender
Basis für die 16-bit-Gerätesysteme und Einrichtungen des *KAAB*
Gerätetechnische Grundkomponenten:
- ICA 710.10 EC 1834 (XT-kompatibel)
- ICA 720.10 modularer PC/AT, Vernetzung mittels Kommunikationskonzept ETHERNET, PROWAY C und anderer Standards.

Betriebssysteme:
DCP (PC-DOS-kompatibel), C-DCP, MUTOS, BOS K 1810, EMOS

▶ **Schrankvariante ICA 710.20 (gegenständlich ausgestellt), ICA 720.20**
Komponenten:
Personalcomputerkern EC 1834 (XT- bzw. AT-kompatibel), echtzeitfähige Prozeßkoppeleinheit mit eigener ZVE, Massenspeicher (Festplattenspeicher, Folienspeicher), Farbbildschirmgerät sind im Schrank untergebracht; die Industrietastatur ist absetzbar angeordnet. Als Prozessor wird der 16-bit-Mikroprozessor K 1810 WM 86 mit 32 Kbyte ROM und 256 Kbyte RAM verwendet, 8 Adapter Steckplätze ermöglichen die Unterbringung der RAM-Erweiterung, der Hard-Disk- und der Floppy-Disk-Ansteuerung, eines Grafikadapters, einer seriellen Schnittstelle und eines Druckeranschlusses. Die Lieferung ist als komplettes Finalerzeugnis (vom Hersteller konfektioniert) vorgesehen.

▶ **Terminalvariante ICA 710.30, 720.30**
Diese Auftisch-(Pult-)Variante in Industrieausführung ist nur begrenzt modular konfigurierbar und für Labor- und Prüffeldautomatisierung oder als Bedien- und Leitstation kleinerer Automatisierungsanlagen vorgesehen. Eine leistungsfähige Prozeßperipherie kann über Erweiterungskassetten angeschlossen und damit ein autarkes Kleinautomatisierungssystem konfektioniert werden.

▶ **Mobile Variante ICA 720.40**
Das mobile Tisch- und Standgerät ist für den Einsatz bei Programmerstellung, Inbetriebsetzung und Service von Automatisierungsgeräten und -anlagen vorgesehen. Durch den Einsatz des PC-DOS-kompatiblen Betriebssystems DCP ist die weltweit verfügbare Software lauffähig. Diese Entwicklung stimmt optimistisch und eröffnet den Anwendern von echtzeitfähigen Mikrorechnern in der DDR eine weite Perspektive.

Wie bereits im Jahr 1987 zeigte der *VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin* (*KAAB*) die **speicherprogrammierbaren Steuerungen MRS 704 und 705** (Bild 13). Sie sind zum Einsatz in einfachen Steuerungen von Einzelmaschinen bis zu komplexen Automatisierungslösungen in funktionell und räumlich verteilter Struktur vorgesehen. Bemerkenswert sind die Netzwerkfähigkeit im Echtzeitbetrieb, ein integriertes Anschluß- und Rangierfeld sowie leistungsfähige Test-, Inbetriebnahme- und Servicefunktionen. Neben den üblichen Beschreibungsmitteln ist eine pascalähnliche Notierungsform möglich. Damit können *alle* in der Anlage eingesetzten Automatisierungsmittel nach einem einheitlichen Konzept programmiert werden. Einsatzgebiete sind Walzwerks-, Zement- und Extruderanlagen, Dieselanlagen- und Zentrifugensteuerungen, TUL-Prozesse u. a.

Das Kombinat *Elektro-Apparate-Werke Berlin Treptow* (*KEAW*) stellte wiederum das prozeßnahe Steuerungs- und Regelungssystem **EAW-electronics S 2000** vor, in diesem Jahr mit den Anwendungsfällen

- Regelung in einer Fermentationsanlage mit S 2000 R (Goldmedaille)
- Regalsteuerung mit S 2000 S (Bild 14).

EAW-electronic S 2000 ist ein frei programmierbares System. Es ist für alle verfahrenstechnischen Steuerungs- und Regelungsaufgaben der Klein- und Mittelautomatisierung universell einsetzbar.

Fördernd wirken eine hohe Variabilität der Hardware und Software. Die auf unterschiedlichen Programmiergeräten lauffähige Entwurfssoftware der Fachsprachen **PROMAR** (für S 2000 R) und **PROLOG** (für S 2000 S) erlaubt rechnergestützte Regelstreckenmodellierung, Reglerentwurf, Erstellung von Anwenderalgorithmen, Simulation und Inbetriebnahme.

Das Baugruppensortiment wurde gegenüber dem Vorjahr erweitert und durch ein tragbares Programmiergerät, das auch den Anschluß eines Druckers und eines Kassettenmagnetbandgeräts gestattet, bereichert. msr berichtete bereits ausführlich in den Heften 6 und 7/1988 über das System S 2000.

Als Erweiterung zum **Programmier- und Entwicklungssystem EAW-electronic P 8000** (Bild 15) wird der **Einchipmikrorechner-Emulator 8000** für die in der DDR produzierten 8-bit-Einchipmikrorechner (U 881, U 882, U 884) und deren Vergleichstypen angeboten.

Er ist als Testgerät für Soft- und Hardware im Entwicklungslabor sowie für den Funktionstest von Baugruppen und Geräten in der Fertigungsprüfung verwendbar. Mit ihm können Anwenderprogramme gestartet und unterbrochen sowie Register und Speicher manipuliert werden. Die Kette von der

[1)] Teil 1 erschien im Heft 7/1988.

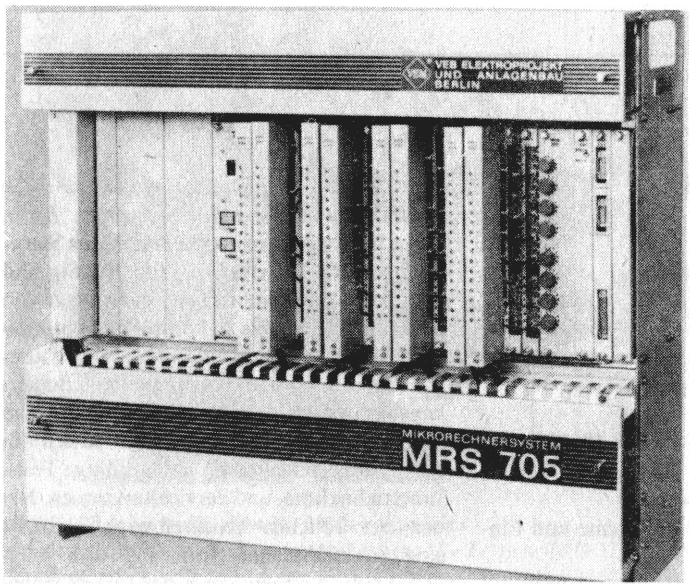


Bild 13. Speicherprogrammierbare Steuerung MRS 705

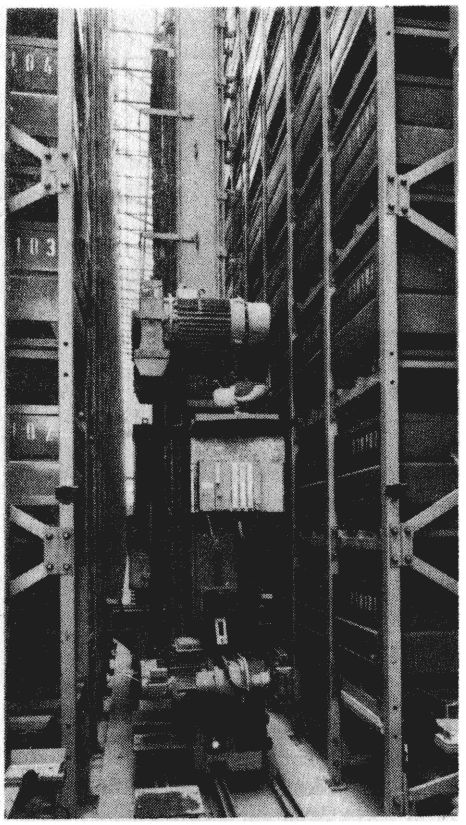


Bild 14. EAW-electronic S 2000 S im Einsatz in einem Hochregallager ▶

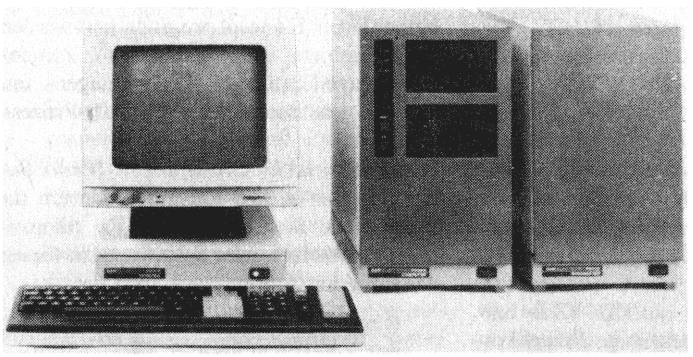


Bild 15. Programmier- und Entwicklungssystem EAW-electronic P 8000

Programmerstellung bis zur In-Circuit-Emulation mit der Anwenderhardware unter Echtzeit ist damit geschlossen. Der EMR-Emulator verfügt über zwei serielle Schnittstellen für den Terminalanschluß zur Kommandoeingabe und für den Anschluß an den P 8000 zum Laden und Retten von zu testenden EMR-Maschinenprogrammen. Die Anpassung des Emulators 8000 an das Anwendersystem erfolgt durch Austausch des Emulatorkabels mit Tastkopf und Adapter.

Technische Daten des neuen Gerätes:

- In-Circuit-Emulation (Echtzeit, 8 MHz)
- 2 V.24-Schnittstellen (RS 232 C) zu Hostrechner und Terminal
- Stand-alone-Betrieb mit Terminal zum Test PROM-residenter Anwenderprogramme
- 28polige Schwenkhebelfassung für Anwender-EPROM
- 4 Tastkopfversionen (UB 8820, UB 8821, UB 8840, UB 8841)
- 3 Adapterversionen (40poliger DIL-Stekker bzw. IC-Clip, 39poliger EFS-Steckverbinder)
- Anwenderspeicher: 4 Kbyte SRAM, 2 Kbyte oder 4 Kbyte EPROM (2716 oder 2732)
- Einzelschrittbetrieb
- maximal 4096 Breakpoints auf Adressen setzbar
- uneingeschränkte und unkonfigurierte E/A-Port-Belegung des Anwenderrechners möglich
- 8 Kbyte Monitor-EPROM (mit Reassembler), 2 Kbyte Monitor-RAM.

Das automatische **Meßsystem EAW-telesmok** (**Tele**metrisches **E**chtzeit-**S**chadstoff-**M**ehrkomponenten-**O**bservations- und **K**ontrollsystem) vom *KEAW* gestattet den Einsatz in Meßnetzen des Umweltschutzes. Dabei geht es um die Ermittlung von Imissionssituationen durch permanente telemetrische Meßdatengewinnung, -umsetzung, -übertragung in eine Zentrale und deren Verarbeitung/Auswertung nach entsprechenden Anforderungen.

Je nach den zur Anwendung kommenden primärmeßtechnischen Sensoren und Meßwertgebern kann der Einsatz dieses Systems zur Schadstoffkontrolle der Luft, des Wassers oder des Bodens erfolgen.

EAW-telesmok ist eine Problemlösung aus Hardware- und Softwarekomponenten der EAW electronic (mit Einbeziehung leistungsfähiger Analysensysteme und Rechentechnik auf Basis des P 8000). Die Aufgabenstellung ist bestimmend für die Konfiguration und den Aufwand in den einzelnen Ebenen. Die Stationen verkehren im Polling- oder Interrupt-Verfahren mit der Zentrale. Die Initiative innerhalb eines Meßsystems geht immer von der Zentrale aus. In einer Station können Befehle von der Zentrale empfangen und in umgekehrter Richtung Meßwerte und Meldungen an die Zentrale abgesetzt werden. Im fernwirktechnischen Teil einer jeden Station werden die elektrisch-analogen oder -digitalen Prozeßmeßwerte erfaßt, in einen 8- oder 12-bit-Dualcode umgesetzt und über das dem jeweiligen Übertragungskanal zugeordnete Ferninterface zur Zentrale übertragen. Die EAW-telesmok-Stationsvariante ermöglicht auch die zeitfolgerichtige, halbstündliche Speicherung der Stationsinformationen, um bei bestimmten Wetterlagen die Meßdatenübertragung zur Zentrale nur einmal täglich durchzuführen. Damit wird eine stark redundante Meßdatenübertragung vermieden und die Übertragungskosten werden bei Nutzung des öffentlichen Fernsprechnetzes auf ein Minimum reduziert. Da die Systemkapazität einer Station 75 bis maximal 150 Datenbyte beträgt, kann im Bedarfsfall außerhalb der EAW-telesmok-Variante jede Station erweitert werden.

Zur Automatisierung von Be- und Verarbeitungsmaschinen eignet sich das **modulare Steuerungssystem SPS 7000** (*VEB Numerik Karl-Marx-Stadt*) mit dem **Programmiergerät PRG 700/710** und dem **Serviceterminal ST 700.** In der Dreikassettenvariante können bis zu 1300 binäre und analoge Eingangs-/Ausgangssignale (Summe) erfaßt und verarbeitet werden.

Von den ausländischen Herstellern von Automatisierungssystemen wurde nur ein kleiner Ausschnitt gezeigt.

Im Rahmen des bulgarischen ISOT-Ausstellungskomplexes stellte das *Institut für Technische Kybernetik und Robotertechnik der BAN Sofia* das seit einigen Jahren im Einsatz befindliche **System MIK 2000** vor (msr berichtete darüber im Heft 4/1987) und zeigte autarke Mikrorechnerregler.

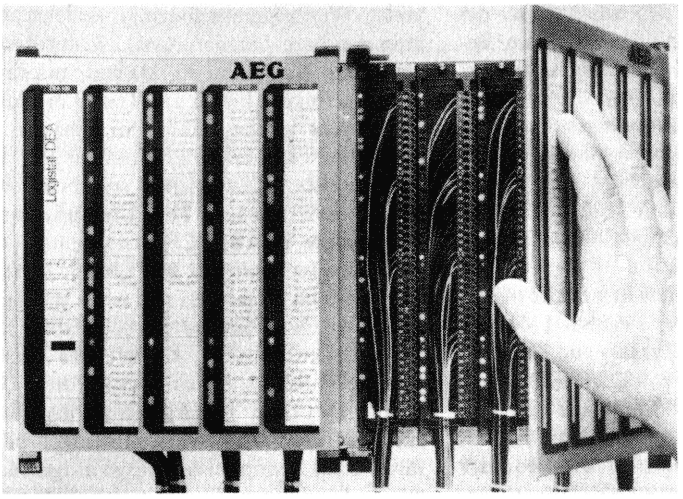


Bild 16. Dezentrale Eingabe-/Ausgabeeinheit DEA des Prozeßleitsystems LOGISTAT CP 80

Mit maximal 576 binären Ein-/Ausgängen gehört die **modulare speicherprogrammierbare Steuerung PROLOCON D1** der Fa. *VILATI*/UVR zu den Geräten der mittleren Leistungsklasse. Sie kann mit EPROM-Leiterplatten bis zu 44 Kbyte bestückt werden. Die Programmierung erfolgt aus der Schaltgleichung über das **Programmiergerät PK 2**.

Im Rahmen des sowjetischen Angebotes an Automatisierungssystemen wurde das **System PS 1001** gezeigt, das über bemerkenswerte technische Charakteristika verfügt. 3 Prozessoren mit jeweils 512 Kbyte Speicherraum sind über jeweils ein Interface mit den Buscontrollern verbunden, die mit abgesetzten Prozeßein- -ausgabeblöcken über serielle Datenleitungen (Koaxialkabel, verdrillte Leitungspaare, Lichtwellenleiter) in Verbindung stehen. Dabei ist jeder Prozessor mit jedem PEA-Block verbunden. In jedem PEA-Block sind an das Interface IR bis zu 16 Eingabe-/Ausgabebaugruppen für analoge und binäre Signale anschließbar. Der Speicherbereich eines Prozessors des zentralen Rechnerteils ist bis auf 4 Mbyte auszubauen.

Eine Vielzahl peripherer Geräte (einschließlich externer Festplatten- und Folienspeicher, Farbbildschirmgeräte) können angeschlossen werden. Interessant sind neben den erwähnten verfügbarkeitserhöhenden redundanten Strukturen auch sicherheitserhöhende Auswahlschaltungen in den Prozeßausgabemodulen (1-aus-3-Auswahl).

Des weiteren wurden dezentrale Komponenten für Prozeßrechnersysteme der Architekturlinien SM-1, SM-2, SM-2M, SM 1634 vorgestellt. Die **Prozeßeingabe-/Ausgabe-Einheit TBCO-1** liefert ein weites Spektrum analoger und binärer Eingangs- und Ausgangssignale. Unter Verwendung der genannten Prozeßrechner und zusätzlicher peripherer Geräte (Bildschirm, Tastatur, externer Folienspeicher, Drucker) werden somit komplette autarke Automatisierungssysteme konfiguriert.

Die Kopplung mit Systemen SM 1210, SM 1634, PS-3000 erfolgt über **IUS/IUS-Koppeleinheiten A 723-7**, die Kopplung mit Systemen M-6000, M-7000, SM-1, SM-2, SM-2M über **IUS/2K-Koppeleinheiten A 723-6** (für einen Entfernungsbereich von 3 km).

Weiterhin wird ein **Terminal SMP 1634.7801** zum Aufbau von Bedienstationen in **Prozeßleitsystemen PMOT-2** angeboten, das maximal 2 Farbbildschirme, 1 Schwarz-Weiß-Bildschirm, 1 Drucker, 1 alphanumerische Tastatur, 1 Bedientastatur, 2 Plattenspeicher und 1 Steuereinheit mit Mikrorechner enthält. Dieses Terminal kann als autonomes Gerät mit loser Kopplung zu den Prozeßrechnern oder als systemintegrierter Bestandteil des Prozeßleitsystems verwendet werden. Es bietet eine Vielzahl von Funktionen der Anzeige und Bedienung von MSR-Stellen mit modernen grafischen Mitteln.

Aus dem reichhaltigen sowjetischen Ausstellungskomplex soll hier noch der Rechner **Elektronika MS 0104** erwähnt werden, der sowohl zur Produktionssteuerung als auch zum Aufbau von Ingenieurarbeitsplätzen genutzt werden kann. Dieser 32-bit-Rechner enthält den Prozessor KM 1807 BM2 mit einem virtuellen (physikalischen) Adreßraum von 4 Gbyte (4 Mbyte) und einem Arbeitsspeicher von 1,5 Mbyte. Als externer Speicher werden ein Festplattenspeicher (Winchester) mit 20 Mbyte und ein Folienspeicher (2 Laufwerke) mit 800 Kbyte eingesetzt. Der Rechner ist grafiktüchtig. Als Bildschirmgerät wird das **Grafikdisplay Elektronika MS 7105** eingesetzt. Der Rechner arbeitet mit dem multifunktionalen Betriebssystem MOS-32M. Compiler werden für die Programmiersprachen FORTRAN, PL/1, PASCAL angeboten. Ebenso werden viele Anwenderprogramme unter Nutzung der interaktiven Grafikoberfläche angeboten.

Das Angebot der NSW-Firmen war reichhaltig, wurde aber in den meisten Fällen nicht körperlich vorgestellt. Hier soll nur ein kurzer Überblick über das Angebot einiger marktbestimmender Firmen gegeben werden.

Siemens/BRD stellte das **Automatisierungssystem AS 215** für Kleinanwendungen im Rahmen des Prozeßleitsystems TELEPERM M vor. Es ist ein autark arbeitendes (Standalone) System mit prozeßtechnischen Funktionen für kleinere bis mittlere Prozeßabläufe. Neben den Automatisierungsfunktionen Meßwerterfassung, Regelung, Binärsteuerung, Rechnen können auch Bedien- und Beobachtungsfunktionen ausgeführt werden. Die immer stärkere Verschmelzung von TELEPERM M und SIMATIC S5 wird deutlich, da die Aufbautechnik und die Komponenten von S5-115 U (Baugruppenträger, PEA-Baugruppen, Stromversorgung) für AS 215 benutzt werden.

Weiterhin steht im Mittelpunkt der Angebotstätigkeit von *Siemens* die Familie der speicherprogrammierbaren Steuerungen **SIMATIC S5**, die sich aus 4 Hauptgruppen zusammensetzt:

▶ **Kleinsteuergerät S5-100 U** (siehe auch Bild 11 im Teil 1): Modularer Aufbau der Zentraleinheit, Peripheriebaugruppen und Rückwandbus. Das Gerät ist beliebig erweiterbar, indem vorbereitete Steckplätze und vormontierte Verdrahtung genutzt werden. Über die Anschaltbaugruppe IM 318 wird der Anschluß an übrige S5-Geräte hergestellt, wobei der Einsatz von S5-100 U dann als intelligenter Peripheriebaustein erfolgt.

▶ **Automatisierungsgerät S5-115 U:** für den Einsatz unter härtesten Umgebungsbedingungen; lüfterlose Ausführung und modularer Aufbau

▶ **Automatisierungsgerät S5-135 U:** Anwendung der Parallelverarbeitung mit maximal 4 Zentraleinheiten. Drei unterschiedliche Prozessoren können eingesetzt werden (für schnelle Steuerungsaufgaben, für Arithmetik- und Wortverarbeitung, für alle Mikrorechneranwendungen mit Nutzung höherer Programmiersprachen). Diese Prozessoren können beliebig gemischt werden. Durch das Multiprocessing stoßen speicherprogrammierbare Steuerungen höherer Leistungsklassen in Bereiche vor, die bisher den Prozeßrechnern vorbehalten waren.

▶ **Automatisierungsgerät S5-150 U:** leistungsstärkstes modular aufgebautes Gerät der Systemfamilie.

Zwischen den 4 Geräten sind Überlappungen der Leistungsbereiche vorhanden. Der Übergang wird erleichtert, da die Baugruppen oft beibehalten werden können und da Programmiergeräte, Kommunikationssysteme, intelligente Peripheriebaugruppen und Software-Module im gesamten System einheitlich zum Einsatz kommen.

Mannesmann/Hartmann & Braun/BRD stellte Komponenten des bewährten Prozeßleitsystems **CONTRONIC P** aus, wobei durch Einsatz eines leistungsstärkeren Prozessors die Leistungsfähigkeit von Prozeßstationen und Leitstationen noch gesteigert worden ist. Im Angebot sind weiterhin die Prozeßstationen mit maximal 352 Kbyte PROM, 192 Kbyte RAM, sehr umfangreichem, modularem Prozeßinterface und Zykluszeiten bis minimal 10 ms, Redundanz 1:4, die Leitstation mit maximal 640 Kbyte PROM und maximal 256 Kbyte RAM (plus 64 Kbyte Speicher für das Bildrollen), externem Festplattenspeicher (16 Mbyte) und Archivspeicher (Magnetbandkassette; 1,2 Mbyte) sowie maximal 3 Farbbildschirmen. Die Koordinator- und Computerinterfacestationen ermöglichen die

Programmierung anwendungsspezifischer Algorithmen in der Koordinierungsebene bzw. komplexer Algorithmen für bis zu 4000 MSR-Stellen.

Honeywell/BRD war mit einem Informationsstand vertreten. Aus dem vielfältigen Angebot, zu dem auch das bekannte Prozeßleitsystem **TDC 3000** gehört, sollen hier zwei Produkte zur Gebäudeautomatisierung herausgegriffen werden. Das Gebäudeleitsystem **Delta Net** arbeitet mit stark dezentralisierter Intelligenz für Meßwerterfassung, Regelung, Steuerung, Prozeßüberwachung und Optimierung mit dem Delta-Net-Peer-Controller (Einplatinengerät, 16-bit-MP MC 68000, 32-Kbyte-Speicher, Wandmontage vor Ort, Multitask-Betriebssystem mit 8 voneinander unabhängigen Programmen), auch als Automatisierungsstation bezeichnet. Die Kommunikation zwischen maximal 29 Automatisierungsstationen erfolgt mittels Delta-Net-Peer-Bus mit serieller Zweidraht-Übertragung (Übertragungsrate 9,6 kbit/s, Tokenbus-Verfahren, RS-485-Schnittstelle, maximal 1200 m, bei Einsatz von Repeatern 4000 m) und dezentraler Bussteuerung in den Automatisierungsstationen. Bei Unterbrechung der Busleitung arbeiten die Teile des Bussystems eigenständig weiter. Die Bedienung erfolgt mittels Handterminal oder von einem Zentralrechner der Leitzentrale (Personalcomputer mit 30-Mbyte-Festplattenspeicher).

Ebenfalls für den Einsatz in der Gebäudeautomation ist das **EXCEL DDC-Leitsystem** von *Honeywell* vorgesehen. Grundelement ist der Kernregler, bestehend aus einem CPU-Modul und mindestens einem Peripheriemodul für 32 Datenpunkte. Ein Kernregler kann etwa 200 Datenpunkte verarbeiten. Das System kann für maximal 1000 Datenpunkte ausgelegt werden. Bis zu 8 Kernregler werden durch ein tragbares Bedienpult überwacht, gesteuert, programmiert. Die Entfernung kann bis zu 1000 m betragen. Damit wird ein autarker Betrieb der EXCEL-DDC-Stationen ermöglicht. Es ist aber auch der Anschluß an Zentralrechner (Personalcomputer bis zu Universal-Minirechner) des Delta-Net-Systems möglich.

Die bisher selbständigen Konzerne *ASEA*/Schweden und *Brown Boveri* (*BBC*)/Schweiz stellten sich nach vollzogener Fusion im Januar 1988 als Unternehmen *ABB* vor. Wichtige Automatisierungssysteme von *ABB* sind weiterhin **ASEA Master** und **PROCONTROL I**. Wesentliche Bestandteile von PROCONTROL I sind die universelle Verarbeitungsstation PROCONTROL I 14, die kompakte Verarbeitungsstation PROCONTROL I 16, die Bedienstation PROCONTROL I 86 und die Datenverarbeitungsstation PROCONTROL I 78.

Die universelle Verarbeitungsstation hat eine Mehrprozessorstruktur mit 8-bit- oder 16-bit-Prozessoren und einem Speicherraum von maximal 128 Kbyte für Firmware/Prozessor und maximal 32 Kbyte Anwenderspeicher/Prozessor (insgesamt maximal 704 Kbyte). Über einen lokalen Parallelbus sind spezialisierte Funktionseinheiten (Verarbeitungsexperte SR 31) anschaltbar, die auch mit SR 31 in lokal abgesetzten Bereichen über eine serielle Schnittstelle verbunden werden können. Des weiteren können dezentrale Automatisierungsgeräte (z. B. digitale Antriebsregelgeräte) unterlagert angeschaltet werden. Insgesamt ergibt sich eine sehr hohe Flexibilität bezüglich Struktur und Verarbeitungsgeschwindigkeit sowie Funktionsumfang der I 14.

Eine Besonderheit ist das gestaffelte Kommunikationssystem. Der Fernbus I 44, der quellortsadressiert im Zyklus- und Ereignisbetrieb arbeitet und zentral verwaltet und überwacht wird, wird direkt auf den Stationsbus der Verarbeitungsstation I 14 umgesetzt. Ein Zubringerbus I 41 dient der Verknüpfung der kompakten Verarbeitungsstationen I 16 untereinander und mit der universellen Verarbeitungsstation I 14.

Er dient auch unter der Bezeichnung Zubringerbus ZB 10 der Verknüpfung der speicherprogrammierbaren Steuerungen **PROCONTIC S, PROCONTIC DP 800** und **PROCONTIC MPST.**

Von der Fa. *AEG*/BRD wurden Komponenten des Prozeßleitsystems **LOGISTAT CP 80** ausgestellt, bestehend aus den Automatisierungsgeräten A 200 und A 500 (Mehrprozessorsystem maximaler Speicherausbau von 1 Mbyte, 16-bit-Prozessoren) und den Bedien- und Anzeigegeräten B 100 (mit Schwarz-Weiß-Bildschirm und Floppy-Disk) und B 500 (mit Farbbildschirm, Lichtgriffel und Hard-Disk) sowie den seriellen Koppelsystemen K 100 (Automatisierungsgeräte untereinander bis etwa 10 km), K 200 (Kopplung von Automatisierungsgeräten und Bedien- und Anzeigegeräten) und K 400 (Kopplung Automatisierungsgerät A 500 mit Prozeßrechner). Die Koppelsysteme sind nach PDV-Busspezifikation DIN 19241 gestaltet. Als Zubringerbus, der die Automatisierungsgeräte A 500 mit den dezentralen Eingabe-/Ausgabeeinheiten DEA (Bild 16) verbindet, wird der Intel-Bitbus eingesetzt (4adrige Leitung, störsicher).

Die Fa. *Foxboro*/BRD bietet weiterhin das **Prozeßleitsystem SPECTRUM** an mit den wesentlichen Komponenten SPEC 200 Micro (dezentrale Mikrorechnerregler), von denen jeweils maximal 30 über einen Kommunikationsmodul mit dem Bussystem FOXNET verbunden werden können, MICROSPEC (Basisverarbeitungsstation mit eigenem oder abgesetztem Prozeßinterface), MULTISTATION (Verarbeitungseinheit mit großer Verarbeitungsleistung und eigenem Bediengerät) Fox 1/A (Prozeßrechner für operative Planung und Leitung) und VIDEOSPEC (Zentrale Bedienstation). Diese Komponenten werden über das Bussystem FOXNET (1 MBaud, maximal 4,5 km) miteinander verbunden.

Die Fa. *Westinghouse Controlmatic*/BRD bot das **Prozeßleit- und Informationssystem WDPF** an. In den dezentralen Prozeßeinheiten werden regelungstechnische und steuerungstechnische Funktionen gemischt ausgeführt. Einbezogen sind auch die Geräte der Numa-Logic-Familie (numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen, speicherprogrammierbare Steuerungen, 32-bit-Rechner). Das Bussystem (2 MBaud, maximal 6 km) verbindet bis zu 254 Teilnehmer und ist als sehr leistungsfähig einzuschätzen.

Auf eine spezielle Produktpalette der Fa. *Phoenix Contact*/BRD soll besonders hingewiesen werden. Die **Überspannungsschutzgeräte TRABTECH** (Transienten-Absorptions-Technologie). Mit diesen Geräten in beachtlich kleiner Bauart ist es möglich, bei Blitzentladungen auftretende Ströme mit Scheitelwerten von 100 kA mit sehr kurzen Anstiegszeiten abzuleiten. Werden diese Geräte z. B. in die Versorgungsenergiezuführung für die Automatisierungsanlage oder für einzelne Automatisierungsgeräte geschaltet, so begrenzt z. B. das Gerät **POWERTRAB** Überspannungen aus Ferneinschlägen und hält Beanspruchungen bei direkten Blitzeinschlägen bedingt Stand. Die Geräte sind speziell zum Einbau in verschiedenste Leitungsarten (z. B. Koaxialkabel, Antennenleitungen, Datenleitungen, Steckdosen oder Drehstromleitungen) ausgelegt.

Abschließend kann gesagt werden, daß die Messe ein recht informatives Forum war. Wenn auch die Auswahl der vorgestellten Exponate aufgrund des breiten Spektrums lückenhaft bleiben muß, so vermitteln die angeführten Daten doch einen Einblick in den gegenwärtigen Stand der Technik. Sie geben Anwendern und Herstellern von Automatisierungsgeräten Anregungen und offenbaren Möglichkeiten für die Rationalisierung und Intensivierung der Produktion. Die gegenwärtigen Grenzen der Meß- und Folgetechnik wurden aufgezeigt. Eine Vielzahl von Neuentwicklungen bietet einen Ausblick auf die Lösungsmöglichkeiten bisher ungelöster Aufgaben. Die hieraus erwachsende Stimulierung des Handels wird zum gegenseitigen Vorteil und damit auch zum gegenseitigen Verständnis beitragen.

msr 8904 H. GENA, P. NEUMANN, H. GOTTSCHALK, J. MÜLLER, H.-H. EHLERT, Red.

Systemanalyse und mehrkriterielle Entscheidung. Von J. ESTER. Berlin: VEB Verlag Technik 1987. 216 Seiten, 157 Bilder, 15 Tafeln. 28,— M.
Bestell-Nr.: 553 727 4

Das Buch reiht sich in die Publikationen zur Optimierung bei mehrkriteriellen Zielsetzungen ein, die im gleichen Verlag erschienen sind. Dieses mehrkriterielle und in der Anwendung ausschließlich rechnergestützte Entscheidungsvorgehen wird in den ersten Abschnitten des Buches anschaulich dargelegt. Dabei wird nicht nur in die Begriffswelt von Kompromiß, Präferenz, Effizienz, Nutzenstheorie oder die Bestimmung und die Aussagen von Pareto-Mengen eingeführt, sondern auch der aktive Umgang mit ihnen gezeigt. Die theoretischen Grundlagen vermitteln insbesondere dem mathematisch interessierten Leser auch Basiswissen. In den insgesamt etwa 400 Gleichungen des Buches ist eine Fülle von Zusammenhängen komprimiert dargestellt. Hervorzuheben ist die Verbindung zu den unscharfen Mengen und Relationen, da solch zentrale Begriffe wie die der Güte oder Präferenz nicht scharf bestimmt sind und sich Hilfestellungen für Entscheidungsträger in komplizierten Situationen durch Beratungssysteme nicht in einem harten Ja oder Nein erschöpfen können. Mit den Ausführungen zu „Decision Support Systems" wird ein sich im Zusammenhang mit der Rechentechnik rasant entwickelndes Gebiet aus der Sicht der mehrkriteriellen Entscheidung beleuchtet.
In einem wesentlichen Teil des Buches wird auf Anwendungsbeispiele aus den Gebieten Konstruktion, Variantenvergleich, Entwurf und Optimalsteuerung eingegangen. Es wird insbesondere der anwendungsinteressierte Leser angesprochen. Die Ausführungen haben demonstrativen Charakter und sind in der Analogie auf ähnliche Problemstellungen übertragbar.
Das Buch ist weiterer Ausdruck der in der DDR entstandenen Schule zur Polyoptimierung und Entscheidungstheorie.

B 2350 ST. F. BOCKLISCH

Fundamentals of Artificial Intelligence. An Advanced Course. Von W. BIBEL und PH. JORRAND. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo: Springer-Verlag 1986. 313 Seiten.

In dem aus Einzelbeiträgen bestehenden Buch werden ausgewählte Grundlagen und spezielle Aspekte zu den Komplexen Repräsentation von Wissen, Strategien zur Wissensverarbeitung und Programmiersprachen für Wissensverarbeitung dargestellt.
Im ersten Abschnitt wird eine Einführung in die Wissensdarstellung und in die Beschreibung des Wissens durch Merkmale, wie Unvollständigkeit, Ungenauigkeit, Relativheit und Unsicherheit, gegeben.
Der zweite Teil des Buches beschäftigt sich mit Strategien zur Wissensverarbeitung. Er gibt eine Einführung in Problemlösungsmethoden deduktiver und induktiver Art, Grundalgorithmen des maschinellen Lernens und in die Methoden zur automatischen Begründung von Hypothesen. Neben der Darlegung wesentlicher Grundkonzepte der genannten Gebiete ist die Bereitstellung eines umfangreichen Literaturverzeichnisses von besonderem Interesse.
Auf Fragen von Sprachkonzepten für die Wissensverarbeitung wird im dritten Abschnitt eingegangen. Vorgestellt werden die im Rahmen des ESPRIT-Projektes entwickelte Sprache FP2, die die funktionale und parallele Programmierung erlaubt, und das Konzept von Concurrent-PROLOG. Beide Sprachkonzepte werden ausführlich mit anderen verglichen sowie Vor- und Nachteile an Beispielen erläutert.
Das Buch stellt insgesamt eine gute Information zu einigen ausgewählten Aspekten des Gebietes der Wissensverarbeitung dar. Durch den Aufbau des Gesamtprojektes aus Einzelbeiträge fehlt jedoch die pädagogische Linie und die Gesamteinordnung in das Gebiet der künstlichen Intelligenz.

B 2246 J. WERNSTEDT

Lokale Netze. Von H. LÖFFLER. Berlin: Akademie-Verlag 1987. 245 Seiten, 137 Bilder, 18 Tafeln. 48,— M.

Stand und Weiterentwicklung technischer Lösungen in allen Bereichen der Volkswirtschaft werden derzeit stark von der Informationstechnologie geprägt. Ein wesentliches Innovationsgebiet ist die Kommunikationstechnik. Der sich vollziehende Übergang zu den Mehrzweck-Kommunikationssystemen für die Informationstypen Sprache, Video und Daten stellt hohe Anforderungen an die technische Realisierung, insbesondere an die Gestaltung der physikalischen und logischen Schnittstellen der kommunizierenden Teilnehmer. Das gilt insbesondere dann, wenn nicht nur die lokale, sondern auch die globale Kommunikation bei der Systemplanung und Implementation zu berücksichtigen sind.
Das Buch orientiert auf lokale Kommunikation und dabei besonders auf solche zwischen Rechnern. Wegen dieser Orientierung werden vom Autor die Dienste der Schichten 1 und 2 des OSI-Referenzmodells für lokale Kommunikationssysteme mit linienförmiger und ringförmiger Topologie unter Verwendung von elektrischen oder Lichtwellenleitern oder mit drahtlosem Kommunikationskanal besonders ausführlich auf etwa 150 Seiten in den Kapiteln 2, 3 und 4 behandelt und durch eine Vielzahl realisierter Systeme illustriert. Schwerpunkt der Darstellung ist die Erläuterung der Kanalzugriffsverfahren. Es ist dem Autor gelungen, dem Leser aus dem Begriffs- und Modifikationswirrwarr der Zugriffsverfahren herauszuhelfen und sowohl das Wirkprinzip jeweils verständlich darzustellen als auch die wesentlichen Verhaltensmodelle zur Berechnung des Verweilzeit- oder des Lastverhaltens anzugeben, um somit einen objektivierten Vergleich der angegebenen Verfahren zu ermöglichen.
Sehr nützlich ist die allgemeine Behandlung lokaler Netze im ersten Kapitel, in dem der Autor die Charakteristika lokaler Netze herausstellt, von der Mehrschichtenstruktur des OSI-Referenzmodells ausgehend die Kommunikationsdienste erläutert und die zugehörigen Kommunikationsprotokolle und Dienstkonventionen beschreibt. Ein Abschnitt über logische und topologische Strukturen sowie über die Grundlagen der elektrischen und optischen Signalübertragung (eine sehr interessante Kurzfassung) schließt das Kapitel 1 ab.
Im 5. Kapitel wird die Kopplung von Netzen mittels Gateways (relativ allgemein) behandelt und im Kapitel 6 abschließend eine Übersicht über vorhandene Standards und ihre Zuordnung zu den Schichten des OSI-Referenzmodells gegeben.
Der Autor, der über ein hohes Maß an Sachkenntnis und wertender Urteilskraft zum beschriebenen Gegenstand verfügt, hat sich bemüht, die Flut der Anglizismen im behandelten Stoff einzudämmen und durchgängig eine sinnvolle deutsche Terminologie dort einzusetzen, wo sie angebracht ist. Der jeweilige Querbezug zu englisch- und russischsprachigen Termini wird hergestellt und der Definitionsinhalt grundlegender Zusammenhänge (insbesondere Protokolle, Dienstkonventionen, Instanzen usw.) in deutlicher Anlehnung an die international üblichen englischen Termini beschrieben.
Wer sich selbst durch die weit verstreute Fachliteratur zu diesem Gebiet durchgearbeitet hat, weiß den Wert dieser gedrängten, verständlich geschriebenen Darstellung über lokale Netze zu schätzen. Das Studium dieses Buches bereitet Freude. Es kann allen Studierenden der Informatik, Informationstechnik und Automatisierungstechnik, aber auch einem breiten Kreis von Spezialisten dieser Fachgebiete empfohlen werden.

B 2368 P. NEUMANN

Kurzfassungen

HORN, M.; RICHTER, W.:

Grenzen selbstkalibrierender Meßsysteme

msr, Berlin 31 (1988) 8, S. 338–340

Fehler selbstkalibrierender Meßsysteme haben einen Optimalwert, der nicht unterschritten werden kann. Dieser Optimalwert hängt vom Quotienten aus dem maximalen zeitlichen Fehleranstieg und der Grenzfrequenz ab. Der zeitliche Fehleranstieg entsteht aus der Alterung des Systems, den Einflußkoeffizienten gegenüber Störgrößen und den zugehörigen maximalen Störgrößenanstiegen. Fehlergrenzen lassen sich daher nur dann wirksam verringern, wenn durch Entwurf, Technologie und Abgleich bzw. automatische Korrektur kleine Fehleranstiege gesichert werden.

SCHUBERT, D.; SCHWABE, F.; UHLIG, T.:

Drucksensor mit piezoresistiven Widerständen aus polykristallinem Silizium

msr, Berlin 31 (1988) 8, S. 341–344

Die dielektrische Isolation der piezoresistiven Widerstände vom Siliziumsubstrat (SOI-Technik) ermöglicht den Einsatz von Siliziumdrucksensoren bis zu Temperaturen über 200 °C bei guter Stabilität der Kennwerte. Die Entwicklung eines SOI-Drucksensors für einen Nenndruck von 100 kPa mit vier Widerständen aus polykristallinem Silizium auf einem rechteckigen Siliziumverformungskörper wurde bis zur Labormusterfertigung geführt. An diesen Drucksensoren wurden die Kennwerte für einen Temperaturzyklus und die Stabilität der Kennwerte unter verschiedenen Lagerbedingungen ermittelt.

HAMANN, C.:

Sensoren mit organischer Komponente

msr, Berlin 31 (1988) 8, S. 345–348

Die nahezu unerschöpfliche Fülle organischer Stoffe der unbelebten und belebten Natur hat ihren Einzug in die Sensorik vollzogen. Durch die sinnvolle Integration elektronischer, mikroelektronischer und optoelektronischer Sensorgrundstrukturen mit Schichten und Schichtsystemen organischer Halbleiter, Leiter, Membranen sowie biologischer Moleküle entstehen Lösungen, die für eine Anwendung in der Industrie, in der Land-, Forst- und Nahrungsgüterwirtschaft, im Gesundheitswesen, im Umweltschutz u. a. Bereichen von Interesse sind.

NOWAK, H.; ALBRECHT, G.; BERTHEL, K.-H.:

Anwendung supraleitender Sensoren für biomagnetische Messungen

msr, Berlin 31 (1988) 8, S. 351–355

Supraleitende Quanteninterferometer (SQUID) sind die derzeit empfindlichsten Sensoren zum Nachweis sehr schwacher Ströme. Gekoppelt mit einem speziellen Antennensystem (Gradiometer) können extrem schwache Magnetfelder (unter 10^{-12} T) nachgewiesen werden. Das Meßsystem wird beschrieben. Die elektrisch aktiven Organe des menschlichen Organismus (Herz, Gehirn, Muskeln) produzieren schwache Magnetfelder, die mit einem Gradiometer-SQUID-Meßsystem registriert werden. Die Signalverarbeitung und Meßergebnisse werden vorgestellt.

ULLMANN, H.:

Festelektrolytsensoren

msr, Berlin 31 (1988) 8, S. 356–360

Für die On-line- oder In-situ-Messung von Konzentrationen oder Verunreinigungen werden chemische Sensoren gebraucht, die in aggressiven Medien und bei erhöhten Temperaturen arbeitsfähig sind. Festelektrolytsensoren haben sich in der Prozeßmeßtechnik, Metallurgie, Energetik und im Umweltschutz als unverzichtbare Kontrollinstrumente eingeführt.

LINSS, G.; BRÜCKNER, P.; NOPPER, C.-B.

CCD-Liniensensoren zur berührungslosen Längenmessung

msr, Berlin 31 (1988) 8, S. 360–364

Im Beitrag werden Stand der Technik, Struktur und Aufbau von CCD-Linienkameras beschrieben. Es werden Meßverfahren zur berührungslosen Längenmessung klassifiziert und die wichtigsten Maßnahmen zur Verringerung der Meßunsicherheit mitgeteilt. An der TH Ilmenau entwickelte Gerätesysteme zur berührungslosen Längenmessung mit CCD-Linienkameras werden vorgestellt.
Die Einsatzerfahrungen und der ökonomische Nutzen ausgewählter industrieller Applikationsbeispiele belegen vor allem die verbesserte Meßökonomie.

Резюме

HORN, M.; RICHTER, W.:

Пределы самокалибровочных измерительных систем

msr, Berlin 31 (1988) 8, стр. 338–340

Погрешности самокалибровочных измерительных систем имеют оптимальное значение, которое не должно быть занижено. Это оптимальное значение зависит от частного из максимального временного нарастания погрешностей и предельной частоты. Временное нарастание погрешностей возникает на основе старения системы, коэффициентов воздействия относительно величин помех и принадлежащих максимальных нарастаний величин помех. Пределы погрешностей, поэтому, можно эффективно уменьшать только тогда, если путем разработки, технологии и компенсации или автоматической коррекции обеспечены небольшие нарастания погрешностей.

SCHUBERT, D.; SCHWABE, F.; UHLIG, T.:

Датчик давления с пьезорезистивными сопротивлениями из поликристаллического кремния

msr, Berlin 31 (1988) 8, стр. 341–344

Диэлектрическая изоляция пьезорезистивных сопротивлений из субстрата кремния (техника SOI) делает возможным применение кремниевых датчиков давления до температур выше 200 °C при хорошей устойчивости показателей. Разработка датчика давления SOI для номинального давления 100 кПа с четырмья сопротивлениями из поликристаллического кремния на прямоугольном кремниевом деформирующем теле ведена до этапа изготовления лабораторного образца. В этих датчиках давления определены характеристики цикла температуры и устойчивость характеристик в различных условиях хранения.

HAMANN, C.:

Датчики с органическими компонентами

msr, Berlin 31 (1988) 8, стр. 345–348

Почти неисчерпаемое изобилие органических веществ органической и неорганической природы вступило в область сенсорики. Путем рациональной интеграции электронных, микроэлектронных и оптоэлектронных основных структур датчиков со слоями и многослойными системами органических полупроводников, проводников, мембран, а также биологических молекул образуются решения, представляющие интерес для их применения в промышленности, сельском хозяйстве, лесном хозяйстве, пищевой промышленности, здравоохранении, в области защиты окружающей среды и в других областях.

NOWAK, H.; ALBRECHT, G.; BERTHEL, K.-H.:

Применение сверхпроводимых датчиков для биомагнитных измерений

msr, Berlin 31 (1988) 8, стр. 351–355

Сверхпроводимые квантовые интерферометры (SQUID) являются в настоящее время самыми чувствительными датчиками для доказательства очень слабых токов. Связаны со специальной антенной системой (градиометр) могут быть доказаны очень слабые магнитные поля (ниже 10^{-12} T). Система измерения описывается. Электрически активные органы человеческого организма (сердце, мозг, мышцы) создают слабые магнитные поля, которые регистрируются при помощи измерительной системы градиометра SQUID. Представлены обработка сигналов и результаты измерений.

ULLMANN, H.:

Твердые электролитические датчики

msr, Berlin 31 (1988) 8, стр. 356–360

Для измерений »on-line« или »in-situ« концентраций или загрязнений требуются химические датчики, работоспособные в агрессивных средах и при повышенных температурах. Твердые электролитические датчики оправдались в области техники измерения процессов, металлургии, энергетики и защиты окружающей среды как контрольные инструменты, от применения которых нельзя отказываться.

LINSS, G.; BRÜCKNER, P.; NOPPER, C.-B.:

Линейные датчики ССД для бесконтактного измерения длин

msr, Berlin 31 (1988) 8, стр. 360–364

В статье описаны состояние техники, структура и построение линейных камер ССД. Классифицированы методы измерения для бесконтактного измерения длин и сообщены основные мероприятия уменьшения погрешности измерения. Представлены приборные системы, разработанные на техническом вузе г. Ильменау, для бесконтактного измерения длин с линейными камерами ССД. Опыт, накопленный при применении, и экономическая польза выбранных промышленных примеров аппликации подтверждают, прежде всего, улучшенную измерительную экономию.

Summaries

HORN, M.; RICHTER, W.:

Limits of Self-Calibrating Measuring Systems

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 338—340

The errors of self-calibrating measuring systems are characterized by an optimal value which can not be further reduced. It depends on the quotient formed by the maximal temporal error rise and the limiting frequency. The temporal error rise results from the system aging, the influencing coefficients with regard to perturbations and the corresponding maximal perturbation quantity rises. The error limits can only be reduced efficiently if low error rises are assured by the design, technology, balancing and automatic correction, respectively.

SCHUBERT, D.; SCHWABE, F.; UHLIG, T.:

Pressure Sensor with Piezo-Resistances Made from Polycrystalline Silicon

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 341—344

The dielectric isolation of the piezo-resistances from silicon substrate allows the use of silicon pressure sensors up to temperatures above 200 °C with a good stability of the characteristics. The development of a pressure sensor for a nominal pressure of 100 kPa containing four resistances from polycrystalline silicon on a silicon deformation solid has arrived at the laboratory specimen production. The characteristics of these pressure sensors for a temperature cycle and their stability under different storage conditions have been determined.

HAMANN, C.:

Sensors Containing Organic Components

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 345—348

The nearly inexhaustible plenty of organic materials of the animated and inanimate nature has entered the design of sensors. By a reasonable integration of electronic, microelectronic and optoelectronic sensor basic structures with layers and layer systems of organic semiconductors, conductors, membranes as well as biological molecules solutions result which are of interest to the application in industries, agriculture, forestry, food industries, public health services, environmental protection etc.

NOWAK, H.; ALBRECHT, G.; BERTHEL, K.-H.:

Application of Superconducting Sensors to Biomagnetic Measurements

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 351—355

Superconducting quantum interferometers are at present the most sensitive sensors for detecting very weak currents. By coupling a special antenna system, extremely weak magnetic fields (below 10^{-12} T) are detectable. The authors describe the measuring system. The electrically active organs of the human organism (heart, brain, muscles) generate weak magnetic fields which can be recorded by means of such measuring systems. The authors present the signal processing and the measurement results.

ULLMANN, H.:

Solide Electrolyte Sensors

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 356—360

For the online in situ measurement of concentrations or pollution chemical sensors are needed which can work in aggressive media and with increased temperatures. Solide electrolyte sensors represent indispensable control devices in process measuring, metallurgy, energetics and environmental protection.

LINSS, G.; BRÜCKNER, P.; NOPPER, C.-B.:

CCD Line Sensors for the Contactless Length Gauging

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 360—364

The authors describe the state of the art, the structure and construction of CCD line cameras. Measuring methods for contactless length gauging are classified and the most important measures for reducing the measurement uncertainty are treated. Device systems for contactless length gauging on the base of CCD line cameras which have been developed by the Ilmenau technical college are presented. Experiences of practical use and the economical benefit of selected industrial application examples show above all the improved measurement economy.

Résumés

HORN, M.; RICHTER, W.:

Limites des systèmes de mesure à auto-calibrage

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 338—340

Les erreurs des systèmes de mesure à auto-calibrage sont caractérisées par une valeur optimale qui ne peut plus être réduite. Elle dépend du quotient formé par la montée d'erreur temporelle maximale et la fréquence limite. La montée d'erreur temporelle résulte du vieillissement de système, des coefficients d'influence en vue des grandeurs perturbatrices et des correspondantes montées maximales des grandeurs perturbatrices. Les limites d'erreurs ne peuvent être réduites efficacement que par la conception, la technologie, l'ajustage ou bien la correction automatique assurant de petites montées d'erreur.

SCHUBERT, D.; SCHWABE, F.; UHLIG, T.:

Capteur de pression à piézo-résistances en silicium polycristallin

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 341—344

L'isolation diélectrique des piézo-résistances en substrat de silicium permet d'appliquer des capteurs de pression à silicium jusqu'à températures au-dessus de 200 °C avec une bonne stabilité des caractéristiques. Le développement d'un capteur de pression pour une pression nominale de 100 kPa contenant quatre résistances en silicium polycrystallin sur un solide de déformation rectangulaire en silicium est arrivé à la fabrication de spécimen de laboratoire. Pour ces capteurs de pression, on a déterminé les caractéristiques pour un cycle de température et la stabilité des caractéristiques sous de différentes conditions de stockage.

HAMANN, C.:

Capteurs à composants organiques

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 345—348

La plénitude presque inépuisable des matériaux organiques de la nature animée et inanimée est entrée dans la construction des capteurs. Par une intégration raisonnable des structures de base de capteur électroniques, micro-électroniques et opto-électroniques avec couches et systèmes de couche des semiconducteurs, conducteurs et membranes organiques ainsi que des molécules biologiques, des solutions résultent qui sont intéressantes pour un emploi dans l'industrie, l'agriculture, les eaux et forêts, les industries alimentaires, la santé publique, la protection de l'environnement etc.

NOWAK, H.; ALBRECHT, G.; BERTHEL, K.-H.:

Application des capteurs supraconducteurs aux mesures biomagnétiques

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 351—355

Les interféromètres quantiques supraconducteurs sont aujourd'hui les capteurs les plus sensibles pour la détection des courants très faibles. Par un couplage d'un système d'antenne spécial, on peut détecter des champs magnétiques extrêmement faibles (au-dessous de 10^{-12} T). Le système de mesure est décrit. Les organes électriquement actifs de l'organisme humain (coeur, cerveau, muscles) engendrent des champs magnétiques faibles qu'on peut enregistrer à l'aide d'un tel système de mesure. Les auteurs présentent le traitement des signaux et les résultats de mesure.

ULLMANN, H.:

Capteurs à électrolyte solide

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 356—360

Pour la mesure en ligne ou sur place des concentrations ou des pollutions, il faut disposer de capteurs chimiques qui peuvent travailler dans les milieux agressifs et avec températures augmentées. Les capteurs à électrolyte solide représentent des dispositifs de contrôle indispensables pour la mesure de processus, la métallurgie, l'énergétique et la protection de l'environnement.

LINSS, G.; BRÜCKNER, P.; NOPPER, C.-B.:

Capteurs linéaires CCD pour la mesure de longueur sans contact

msr, Berlin 31 (1988) 8, pp. 360—364

Les auteurs décrivent l'état présent, la structure et la construction des caméras linéaires CCD. Les méthodes de mesure pour la mesure de longueur sans contact sont classifiées et les pas les plus importants pour réduire l'incertitude de mesure sont traités. Le système de dispositifs développé par l'école supérieure technique d'Ilmenau pour la mesure de longueur sans contact à l'aide de caméras linéaires CCD est présenté. Les expériences pratiques et le bénéfice économique d'examples d'emploi industriels choisis montrent surtout l'économie de mesure améliorée.

Neue Bücher aus der UdSSR

Hierbei handelt es sich um neue Titel aus der UdSSR, die dem sowjetischen Neuerscheinungsdienst „Novye knigi" entnommen sind. Die Bücher können über den Volksbuchhandel bestellt werden.

[1] LISENKOV, A.; ŠITOV, JU.: Upravlenie biotechnologičeskimi processami po dannym tekuščich nabljudenij (Steuerung biotechnologischer Prozesse nach laufenden Beobachtungen). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 1. Quart. 1988. NK 87-52 (92).

[2] MALAŠENKO, JU.; ROGOŽIN, V.; FEROPONTOV, E.: Živučest' setevych sistem (Lebensfähigkeit von Netzwerksystemen). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 4. Quart. 1988. NK 87-52 (93).

[3] MALAŠENKO, JU.; NOVIKOVA, N.: Mnogokriterial'nyj i maksiminnyj analiz mnogoproduktovych setej (Polyoptimale und Minimax-Analyse von Mehrproduktnetzwerken). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 2. Quart. 1988. NK 87-52 (94).

[4] Matematičeskoe modelirovanie i diskretnaja optimizacija (Mathematische Modellierung und diskrete Optimierung). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 1. Quart. 1988. NK 87-52 (95).

[5] MIJUSOV, P.: Modeli skrytych markovskich processov i ich ispol'zovanie pri avtomatičeskom raspoznavanii reči (Modelle verborgener Markovscher Prozesse und ihre Anwendung bei der automatischen Spracherkennung). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 1. Quart. 1988. NK 87-52 (98).

[6] ORLOVA, G.: Instrumental'nye sredstva dlja formirovanija procedur rasčetov složnoj struktury v sisteme proektirovanija i planirovanija avtomatizirovannogo proizvodstva (Werkzeuge zur Entwicklung von Berechnungsprozeduren für komplizierte Strukturen in Systemen der Projektierung und Planung der automatisierten Produktion). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 4. Quart. 1988. NK 87-52 (99).

[7] SEMENOV, M.; BROVKIN, V.: Modelirovanie agroekosistem. Adaptivnoe razvitie (Modellierung von Agro-Ökosystemen. Adaptive Entwicklung). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 2. Quart. 1988. NK 87-52 (104).

[8] CAREVSKIJ, N.: Kompleks zadač operativnogo kalendarnogo planirovanija dlja avtomatizirovannych proizvodstv (Komplex von Aufgaben bei der operativen Belegungsplanung für automatisierte Produktion). Nauč. Vyčislit. centr. AN SSSR. 4. Quart. 1988. NK 87-52 (115).

[9] ŠAKIN, V.; KARASEV, A.; MEŠALKIN, L.: Matematičeskoe modelirovanie reguljacii krovoobraščenija (Mathematische Modellierung der Blutkreislaufregelung). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 4. Quart. 1988. NK 87-52 (121).

[10] ŠAFRANSKIJ, V.; AKIMOV, A. u. a.: Intellektual'nye sistemy proektirovanija i planirovanija avtomatizirovannogo proizvodstva (Intellektuelle Systeme zur Projektierung und Planung der automatisierten Produktion). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 4. Quart. 1988. NK 87-52 (122).

[11] ŠAFRANSKIJ, V.: Struktura kompleksa modelirovanija i planirovanija gibkogo proizvodstva (Struktur des Aufgabenkomplexes zur Modellierung und Planung flexibler Produktion). Nauč. Vyčislit. centr. AN SSSR. 4. Quart. 1988. NK 87-52 (123).

[12] ŠEVČENKO, V.: Analiz diskretnych modelej konfliktnych situacij (Analyse von diskreten Modellen von Konfliktsituationen). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 2. Quart. 1988. NK 87-52 (124).

[13] ŠKOTIN, A.: Metody dokazatel'stva pravil'nosti semantičeskich programm seteyoj modeli dannych (Methoden zum Beweis der Richtigkeit semantischer Programme für Netzdatenmodelle). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. NK 87-52 (125).

[14] AVERKIN, A.: Nečetkoe otnošenie modelirovanija v ekspertnych sistemach (Unscharfe Modellbeziehungen in Expertensystemen). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 3. Quart. 1988. NK 87-52 (127).

[15] Avtomatizacija programmirovanija (Automatisierung der Programmierung). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 2. Quart. 1988. NK 87-52 (128).

[16] VOROTYNCEV, A.; MUCHITDINOV, F.: Imitacionnaja dialogovaja sistema „Niva" (Simulations-Dialogsystem „Niva"). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 3. Quart. 1988. NK 87-52 (135).

[17] GONČAROV, S.; SUCUPAL, V.: Interaktivnaja grafičeskaja sistema dlja issledovanija rečevych signalov (Interaktives grafisches System zur Untersuchung von Sprachsignalen). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 1. Quart. 1988. NK 87-52 (138).

[18] MUROMSKIJ, A.: Programmnye sredstva kak ob'ekt klassifikacii (Programmierwerkzeuge als Gegenstand der Klassifikation). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 3. Quart. 1988. NK 87-52 (152).

[19] Programmnoe obespečenie SAPR (Software für CAD). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 4. Quart. 1988. NK 87-52 (157).

[20] Programmnoe obespečenie složnych avtomatizirovannych sistem (Software für komplizierte automatisierte Systeme). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 1. Quart. 1988. NK 87-52 (158).

[21] SOROKIN, S.: Opyt modifikacii dialogovych sistem (Erfahrungen bei der Modifizierung von Dialogsystemen). Nauč. Vyčislit. centr AN SSSR. 4. Quart. 1988. NK 87-52 (164).

[22] SEN'KO, O.: Ob odnom algoritme raspoznavanija složnych ob'ektov (Zu einem Algorithmus zur Erkennung komplizierter Objekte). Nauč. Vyčislit. centr. AN SSSR. 2. Quart. 1988. NK 87-52 (212).

[23] MAMEDOV, M.: Matematičeskaja teorija ierarchičeskich struktur (Mathematische Theorie hierarchischer Strukturen). Azernešr (AzSSR). 4. Quart. 1988. NK 87-52 (247).

[24] VAJNER, A.: Informatika i vyčislitel'naja technika v voennom dele (Informatik und Rechentechnik im Militärwesen). Izd-vo DOSAAF. 2. Quart. 1989. NK 87-52 (248).

[25] ČESALOV, S.; ŠMAGIN, B.: Statističeskie metody rešenija gidrogeologičeskich zadač na EVM (Statistische Methoden zur Lösung hydrogeologischer Aufgaben auf der EDV-Anlage). Nedra. 4. Quart. 1989. NK 88-2 (119). msr 8878

Impressum

messen · steuern · regeln

Herausgeber: Kammer der Technik, Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)

Verlag: VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, DDR-1020, Telegrammadresse: Technikverlag Berlin; Telefon 2 87 00; Telex: 011 222 8 techn dd

Verlagsdirektor: Dipl.-Ing. KLAUS HIERONIMUS

Redaktion: Dr.-Ing. DIETRICH WERNER, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2 87 03 62)

Dr.-Ing. JÜRGEN WEDE, Redakteur (Telefon: 2 87 03 74)

Gestaltung: KAREN WOHLGEMUTH (Telefon: 2 87 02 88)

Lizenz-Nr.: 1112 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik

AN (EDV): 15 936

Erscheinungsweise: monatlich 1 Heft

Heftpreis: 4,— M, Abonnementpreis vierteljährlich 12,— M; Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebs BUCHEXPORT zu entnehmen

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", Bad Langensalza, 5820

Anzeigenannahme: Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, 1020. Anzeigenpreisliste Nr. 7; Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR-1157

Rechtsvorbehalt: Nachdrucke, Übersetzungen sowie Vervielfältigung jeglicher Art von vollständigen oder auszugsweisen Text- oder Bildbeiträgen bedürfen der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Verlages. Referate, Besprechungen und genehmigte Vervielfältigungen sind nur mit genauer Quellenangabe zulässig. Erfüllungsort ist der Sitz des Verlages in Berlin-Mitte.

Bezugsmöglichkeiten:

DDR: sämtliche Postämter

SVR Albanien: Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Bruga Konference e Pezes, Tirana

VR Bulgarien: Direkzia R.E.P., 11a, Rue Paris, Sofia

VR China: China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P.O. Box 88, Beijing

ČSSR: PNS — Ústřední Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezska 11, 12000 Praha 2; PNS, Ústredná Expedicia a Dovoz Tlače, Posta 002 885 47 Bratislava

SFR Jugoslawien: Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarako Produzeče MLADOST, Ilica 30, Zagreb

Koreanische DVR: CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang

Republik Kuba: Empresa de Comercio Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana

VR Polen: C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa

SR Rumänien: D.E.P. Bukureşti, Piaţa Scienteii, Bukureşti

Ungarische VR: P.K.H.I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P.O. Box 16, 1426 Budapest

UdSSR: Städtische Abteilungen von Sojuzpečat oder Postämter und Postkontore

SR Vietnam: XUNHASABA, 32, Hai Ba Trung, Hanoi

BRD und Berlin (West): ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141—167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30

Österreich: Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, A-2345 Brunn am Gebirge

Schweiz: Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstraße 109, 8033 Zürich

Alle anderen Länder: örtlicher Buchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Postfach 160, Leipzig, DDR-7010 und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR-7010.

Abnahmebedingungen:

Die Redaktion veröffentlicht nur Originalbeiträge. Für Nachdrucke, Übersetzungen oder Vervielfältigungen jeglicher Art gilt der Rechtsvorbehalt. Die Redaktion behält sich Änderungsvorschläge bei der Beitragsbearbeitung vor. Die Beiträge müssen generell mit einer Veröffentlichungsfreigabe des Betriebes oder der Institution der Autoren versehen sein.

Bei der Anfertigung von Beiträgen sind unbedingt die Manuskripthinweise zu beachten. Diese sind dem Heft 5/1988, S. 237, zu entnehmen bzw. werden von der Redaktion auf Anfrage zugesandt. Die Einhaltung der Manuskripthinweise bildet die Voraussetzung für eine zügige und sachgerechte Beitragsbearbeitung.

XI. IMEKO-Weltkongreß

Vom 16. bis 21. Oktober 1988 findet in Houston (Texas)/USA der XI. Weltkongreß der Internationalen Meßtechnischen Konföderation (IMEKO) unter dem Motto „Meßtechnik für das 21. Jahrhundert" statt. Veranstalter ist die Instrument Society of America (ISA) in Zusammenarbeit mit dem National Bureau of Standards der USA und dem IMEKO-Sekretariat in Budapest.
Zu folgenden Kongreßschwerpunkten werden Plenarsessionen, Vortragssessionen, Postersessionen und Rundtischgespräche durchgeführt:

— Metrologie
— Sensoren und Datengewinnung
— Signalübertragung
— Signalaufbereitung und -verarbeitung
— Ausgabe und Weiterverarbeitung von Daten
— Systemaspekte
— Praktische Anwendungen von Messungen
— Weiterbildung, Training.

Weitere Auskünfte erteilen:
1. Instrument Society of America
   67 Alexander Drive
   Research Triangle Park, NC 27709
   USA
   Tel.: (919) 549-8411
   Telex: 802540
2. IMEKO-Secretariat
   P.O.B. 457
   H-1371 Budapest
   Hungary
   Tel.: (36-1) 53 15 62
   Telex: 225 792 mtesz h.

ACASP '89

Vom 19. bis 21. April 1989 findet in Glasgow/GB das IFAC-Symposium „Adaptive Systems in Control and Signal Processing" statt.

Tagungsschwerpunkte:

a) Adaptive Steuerung
— Theorie der selbsteinstellenden Steuerungen
— Modellreferenzsteuerungen
— Konvergenzeigenschaften
— Reglerentwurf für adaptive Systeme
— Identifikationsalgorithmen für Anwendungen in der adaptiven Regelung
— Robustheit adaptiver Regler
— Einfache selbsteinstellende Regler
— Polverschiebende und optimale selbsteinstellende Regler
— Multivariable adaptive Mehrgrößenregelungssysteme
— Nichtlineare adaptive Regelungssysteme
— Fuzzy-Regler mit Expertensysteme mit Lernfähigkeit
— Adaptive „feed-forward"-Steuerung

Anwendungen in:
- Robotik
- Fertigungssystemen
- verfahrenstechnischen Anlagen
- Energiesystemen
- Raumfahrt
- Maritimer Industrie
- Glasindustrie
- Biologischen Systemen

b) Signalverarbeitung
— Adaptive Filter
— Entwurf von Glättern und Vorhersagern
— zweidimensionale adaptive Filtersynthese
— Entwurf von FIR- und IIR-selbsteinstellenden Schätzern
— Nichtlineare adaptive Schätzer
— Robuste Schätzung
— VLSI-Technik zur Anwendung der adaptiven Signalbearbeitung
— Adaptive Gradientenalgorithmen

Anfragen an:

IFAC Symposium: ACASP '89
Conference Division
The Institute of Measurement and Control
87 Gower Street
London WC1E 6AA

9. Zuverlässigkeitstagung „Qualität und Zuverlässigkeit in automatisierten Produktionsprozessen"

Die o. g. wissenschaftlich-technische Veranstaltung wird am 11. und 12. Mai 1989 in Leipzig durchgeführt.

Veranstalter:

Fachverband Elektrotechnik in der Kammer der Technik
Wissenschaftliche Sektion Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit

Inhaltliche Schwerpunkte:

1. Theoretische Grundfragen der Zuverlässigkeitstechnik
   - Modellierung der Zuverlässigkeit technischer Systeme
   - Systeme mit mehreren Niveaus der Funktionstüchtigkeit (Leistungssysteme, Funktionseffektivität, Importanzanalyse)
   - Zuverlässigkeit von Netzen
   - Fehlertolerante Systeme
2. Ausfallmechanismen und Ausfallanalyse
   - Screeningmethoden
   - Beschleunigung der Ausfallmechanismen
   - Methoden der Fehleranalyse
3. Fertigungsprozeß und Zuverlässigkeit
   - Stabilität und Zuverlässigkeit im technologischen Prozeß
   - Prozeßzuverlässigkeit und Erzeugnisqualität
   - Rechnereinsatz zur Prozeßstabilisierung und Qualitätssicherung
4. Zuverlässigkeit unter Umgebungsbeanspruchungen
   - Konstruktive und prüftechnische Zuverlässigkeitssicherung bei mechanisch und klimatisch beanspruchten Erzeugnissen
   - Degradations- und Störmechanismen für umweltbeanspruchte Bauteile und Geräte
   - Klassifizierung von Umgebungseinflüssen und Ableitung zugeordneter Prüfschärfen
5. Qualität der Software
   - Grundfragen (Qualitätsmerkmale, Bewertung, Schnittstellen zur Hardwarequalität)
   - Qualitätssicherung im Prozeß der Softwareherstellung
   - Beitrag der Qualität der Software zur Qualität komplexer Lösungen.

Zu diesen Schwerpunkten werden Vorträge bis zum **17. Oktober 1988** entgegengenommen. Vortrags- und Teilnahmemeldungen sind schriftlich an folgende Anschrift zu richten:

Kammer der Technik — Präsidium
Fachverband Elektrotechnik
Clara-Zetkin-Str. 115—117
Berlin
1086.

Roboterarm mit hoher Positioniergenauigkeit

Die Fa. *Hirata Industrial Machinery Co.*/ Japan bietet einen Roboterarm an, der speziell für die Bestückung von Leiterplatten geeignet ist. Der Roboterarm mit der Bezeichnung AR-DD2700 ermöglicht eine Positioniergenauigkeit von 8 µm bei einer Maximalgeschwindigkeit von 6,8 m/s und einer Zykluszeit von weniger als 0,8 s für eine 300-mm-Leiterplatte.
Mit dem Standard-Controller HAC-164 kann der Roboterarm kontinuierlich oder von Punkt zu Punkt gesteuert werden. Die Steuerung erfolgt mit einem 16-bit-Mikroprozessor, in dessen Speicher bis zu 1000 Bestückungspositionen abgelegt werden können. Der Roboterarm hat eine Tragfähigkeit von 1 kg.

Drehwinkelgeber auf Laserbasis

Der Drehwinkelgeber R-2A von *Canon Inc.*/ Japan nutzt die Interferenz von gebeugtem Laserlicht und einem feingemusterten Radialgitter, um maximal 810000 Impulse je Sekunde zu erzeugen. Die Winkelgenauigkeit ist besser als 20 Bogensekunden.
Mit einer Länge von 48 mm und einem Durchmesser von 36 mm kann der Drehwinkelgeber z. B. in jede Bewegungsachse eines Roboterarmes eingebaut werden. Der Geber arbeitet mit +/— 5 V und 200 mA. Die Lichtquelle ist ein Halbleiterlaser mit einer Wellenlänge von 780 nm, 5 mW maximaler Ausgangsleistung und einer Lebensdauer von 200000 Stunden. Die maximale radiale Wellenbelastbarkeit beträgt 0,4 kg.

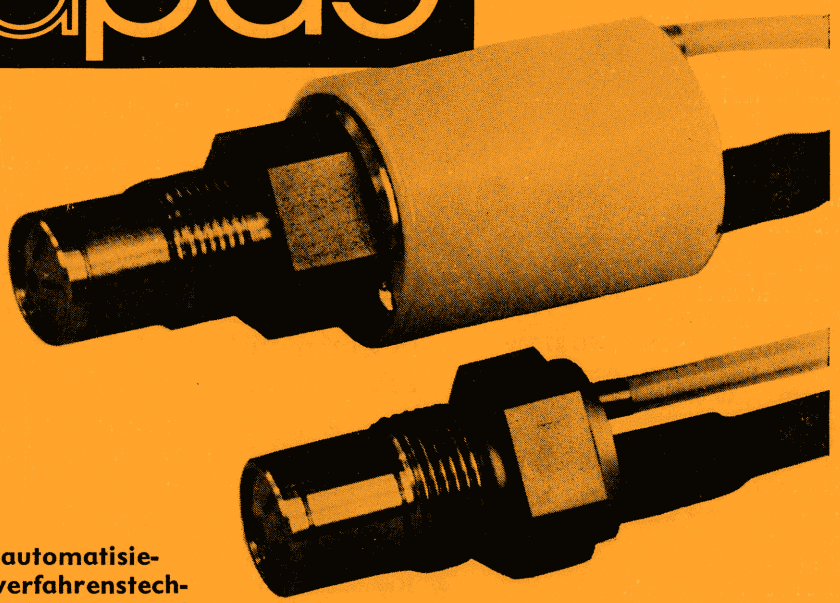
ISSN 0026-0347, mess., steuern, regeln
Berlin 31 (1988) 8, S. 337—384

35930 6 159 549 964
APW
4073 7001 1910 SHAT 11

– audapas DRUCKWANDLER –

modernste mikroelektronische Druckmeßtechnik für die Meßgrößen Absolutdruck oder Überdruck

audapas®



Einfachste Montage,
wartungsfrei,
klein, robust,
sehr zuverlässig,
einsetzbar
in allen
Wirtschaftsbereichen

Chemie/Energie	**— Prozeßautomatisierung verfahrenstechnischer Anlagen und in Kraft- und Heizwerken**
	— technische Diagnostik
Wasserwirtschaft/ Umweltschutz	**— Wasserstandsmessung**
Meteorologie	**— Luftdruckmessung, Höhenmessung**
Fahrzeugbau/ Schiffbau	**— Betriebsüberwachung von Motoren und Aggregaten**
Medizintechnik	**— Dialysegeräte**
Landwirtschaft	**— Bodendruckmessung, Fütterungsanlagen**
Krananlagen	**— Hydraulische Lastüberwachung**

Bestellen Sie sofort Informationsmaterial!

Technische Daten

Eingangsgrößen	Absolutdruck, Überdruck
Ausgangsgröße	
mit Verstärker	4 ... 20 mA
ohne Verstärker	0 ... 200 mV
Kennlinienabweichung	0,3% bis 1,3% (je nach Anwenderforderung)
Explosionsschutz	Ex Ib IIC
Einsatztemperatur	—25 °C bis +80 °C
Zulassungen für den Einsatz auf Schiffen	DSRK der DDR, Register der UdSSR
Hilfsenergie	24 V Gs

VEM VEB GRW TELTOW

VEB Geräte- und Regler-Werke „Wilhelm Pieck" Teltow
Betrieb des VEB Kombinat Automatisierungsanlagen
Oderstraße 74—76 · Teltow · DDR · 1530 · Tel.: 440 · Telex 015441